ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(6):20-33
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.276:628.3 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_20

ВЛИЯНИЕ БИОМЕТАНОГЕНЕЗА НА ГАЗОВЫЙ БАЛАНС УГОЛЬНЫХ ШАХТ

О.В. Тайлаков[1], Е.А. Уткаев[2], А.А. Тайлаков[2], А.А. Рябцев[2]

[1] АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Кемерово, Россия, e-mail: tailakov@nc-vostnii.ru
[2] Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия

Аннотация: Приведены результаты экспериментального исследования изотопного состава углерода метана, выполненного с применением современного метода резонансно-усиленной спектроскопии. Изучены пробы газа, отобранные непосредственно из угольных пластов, а также из рудничной атмосферы действующих выемочных участков угольных шахт Кузбасса. На основе прецизионного анализа содержания стабильных легких изотопов углерода и последующего определения изотопной сигнатуры получено экспериментальное подтверждение вклада биогенных процессов в общее газовыделение. Установлено, что часть метана, присутствующего в рудничной атмосфере, имеет биогенную природу. Статистическая обработка полученных данных показала, что до 65% исследованных проб рудничного воздуха содержит метан, образованный в результате жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов. Представлена кинетическая модель, позволяющая количественно оценить потенциал биогенного газовыделения в зависимости от горно-геологических и микробиологических факторов. Показано, что непрерывный микробиологический метаногенез, протекающий в углепородном массиве и выработанном пространстве, формирует дополнительную метанообильность выемочных участков, достигающую 1 м^3 на тонну добываемого угля. Особенностью этого процесса является его постоянный, длительный фоновый характер. В отличие от десорбционных процессов, напрямую связанных с темпом ведения очистных работ, биогенная эмиссия метана протекает непрерывно и независимо от скорости подвигания очистного забоя. Результаты исследования подтверждают целесообразность учета биогенной составляющей для точного прогноза газовой обстановки и повышения эффективности управления безопасностью ведения горных работ.

Ключевые слова: газовый баланс, угольная шахта, метан, метаногенез, изотопный анализ, шахтная атмосфера, дегазация, безопасность горных работ, адсорбция, кинетическая модель.

Благодарность: Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук», проект FWEZ-2026-0002 «Разработка методов комбинированного применения геофизических систем прогноза, контроля и управления состоянием горного массива, а также технологий предотвращения газодинамических явлений и мониторинга проведенных мероприятий по их реализации» (рег. № 1023032200092-2-1.5.1;2.7.5).

Для цитирования: *Тайлаков О. В., Уткаев Е. А., Тайлаков А. А., Рябцев А. А.* Влияние биометаногенеза на газовый баланс угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 6. – С. 20–33. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_20.

© О.В. Тайлаков, Е.А. Уткаев, А.А. Тайлаков, А.А. Рябцев. 2026.

Influence of biomethane genesis on gas balance in coal mines

O.V. Tailakov[1], E.A. Utkaev[2], A.A. Tailakov[2], A.A. Ryabtsev[2]

[1] Scientific Center VostNII for Industrial and Environmental Safety in Mining Industry, Kemerovo, Russia, e-mail: tailakov@nc-vostnii.ru

[2] Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russia

Abstract: The article describes the experimental studies on isotopic composition of carbon in methane using the present-day method of the resonance-enhanced spectroscopy. The test gas samples were from coal seams and from air in operating longwalls in coal mines in Kuzbass. The precision analysis of content of stable light carbon isotopes and later determination of an isotopic signature allowed an experimental confirmation of contribution of biogenic processes in total gas emission. It is found that some methane present in mine air has a biogenic nature. The statistical processing of the obtained data shows that 65% of the test samples of mine air contain methane generated as a result of activity of methanogens. A kinetic model is presented, which offers a quantitative evaluation of biogenic gas emission potential depending on geological and microbiological factors. It is demonstrated that continuous microbial methanogenesis in coal–rock mass and in mined-out space adds to the methane content of up to 1 m3 per ton of coal in longwalls. A feature of the process is its constant and long-term background effect. Unlike desorption being directly correlated with the rate of coal-face work, biogenic methane emission runs continuously and irrespective of the coal face advance rate. The research findings confirm the expediency of taking into account the biogenic component of the mine air gas content toward its more accurate prediction and for the enhanced efficiency of mining safety management.

Key words: gas balance, coal mine, methane, methanogenesis, isotopic analysis, mine air, gas drainage, mining safety, adsorption, kinetic model.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state contract with the Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, SB RAS, Project FWEZ-2026-0002: Development of Methods for Integrated Application of Geophysical Prediction and Ground Control, and Prevention Technologies for Gas-Dynamic Phenomena, and Their Implementation Monitoring, Registration No. 1023032200092-2-1.5.1;2.7.5.

For citation: Tailakov O. V., Utkaev E. A., Tailakov A. A., Ryabtsev A. A. Influence of biomethane genesis on gas balance in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(6):20-33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_6_0_20.

Введение

Газовый баланс угольной шахты формируется в результате процессов выделения и миграции газа из углепородного массива, в первую очередь из отрабатываемых угольных пластов, а также из вышележащих и нижележащих пластов-спутников. Основным компонентом газа, выделяющегося из угольных пластов, является метан, который адсорбирован в порах и трещинах угля и переходит в свободное состояние под воздействием давления и температурных градиентов.

Миграция газа происходит как внутри пласта, так и через вмещающие горные породы, что формирует общий газовый баланс шахты и оказывает существенное

влияние на безопасность и эффективность горных работ [1, 2].

Важным этапом в понимании процессов формирования газового баланса [3] является выдвижение гипотезы участия метана, находящегося в форме твердого газового раствора в угле. Эта гипотеза, предложенная в [4] и развитая в [5, 6], заключается в предположении, что метан в угольном пласте находится в различных формах связи с угольным веществом. Согласно традиционным представлениям, метан присутствует в свободном состоянии в порах и трещинах, а также в адсорбированном состоянии на поверхности угольной матрицы. При этом, помимо адсорбции, метан может находиться в абсорбированном состоянии, образуя твердый газовый раствор в объеме угольного вещества. Таким образом, реализуются две принципиально разные формы связи: физическая адсорбция на поверхности и абсорбция (твердофазное растворение) в структуре угля. Наличие метана в форме твердого раствора существенно влияет на кинетику выделения газа и его миграцию, так как процессы десорбции из твердого раствора требуют иных энергетических затрат и протекают по иным закономерностям по сравнению с десорбцией с поверхности. Данная концепция позволила уточнить механизмы формирования газового баланса, учитывая фазовые состояния метана и их переходы при изменении термодинамических условий в угольном пласте.

Кроме того, в формировании газового баланса угольной шахты значительную роль играет биогенный метан, что подтверждается результатами изотопного анализа углерода в шахтном метане [7–10]. В исследованиях изотопного состава углерода показано наличие биогенного компонента, образующегося в результате биометаногенеза в угольных пластах, выработанном пространстве и вмещающих породах [11–13]. Биогенный метан отличается по изотопному составу от термогенного, что позволяет выделить его вклад в общий газовый баланс и оценить влияние биологических процессов [14] на газодинамику шахты.

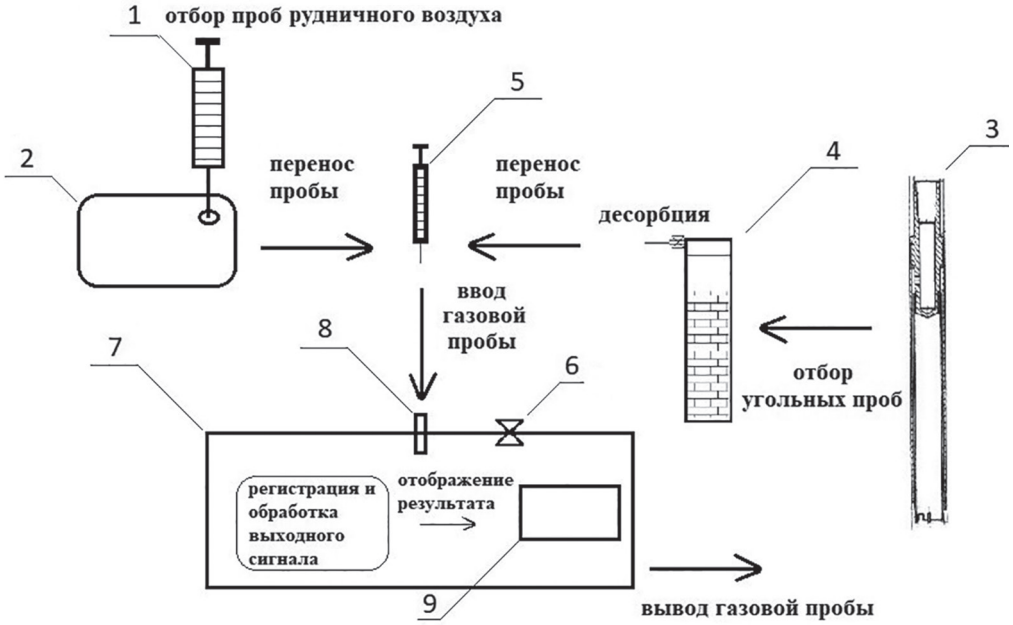
Таким образом, современное понимание формирования газового баланса угольной шахты требует комплексного учета как физических и химических процессов выделения и миграции метана из угольных пластов [15], так и биогенных процессов метаногенеза. В этой связи поставлена задача уточнения влияния биометаногенеза на формирование газового баланса угольной шахты для повышения точности его прогнозирования, совершенствования методов контроля и управления газовой безопасностью, а также уточнения допустимой нагрузки на очистной забой с учетом газового фактора.

Методика исследований

Содержание стабильных изотопов углерода принято описывать относительным отклонением отношения $(^{13}C/^{12}C)^{обр}$ для образца от стандартного значения Pee Dee Belemnite (PDB), которое представляет собой соотношение $(^{13}C/^{12}C)^{PDB}$, зарегистрированное в окаменевших останках моллюска Belemnitella americana из формации Пи-Ди. Смещение изотопного состава углерода относительно международного стандарта PDB — изотопная сигнатура определяется по формуле [7, 8]

$$\delta^{13}C = \left(\frac{\left(\frac{^{13}C}{^{12}C} \right)^{обр}}{\left(\frac{^{13}C}{^{12}C} \right)^{PDB}} - 1 \right) \cdot 10^3 . \quad (1)$$

Для изучения изменения содержания легких изотопов углерода метана в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, в зависимости от условий зале-



1 – пробоотборник; 2 – пробоотборный пакет; 3 – керноотборник; 4 – герметичная емкость; 5 – газовый шприц; 6 – регулятор воздуха; 7 – анализатор изотопного состава углерода метана DLT-100 (MCIA); 8 – устройство ввода пробы; 9 – цифровой дисплей

Рис. 1. Схема определения содержания легких изотопов углерода в шахтном метане
Fig. 1. Diagram of the sampling system for determining the content of light carbon isotopes in coal mine methane

гания угольных пластов и параметров выемки угля выполнен отбор следующих проб в шахтных условиях [16]:

• метановоздушной смеси рудничной атмосферы, пробы которой отбирались пробоотборником (*1*) в пробоотборный пакет (*2*) со штуцером для шланга и клапаном с мембраной под шприц;

• метана, содержащегося в угольном керне, который выбуривался из рабочего угольного пласта с применением кернонаборника (*3*) и размещался в герметичную емкость (*4*), изготовленную из инертного материала и оснащенную манометром, съемной газонепроницаемой крышкой с газонепроницаемым клапаном и отводным штуцером с шаровым краном.

Выделившийся из угольной пробы метан и метановоздушная смесь рудничной атмосферы отбирались последовательно в специальный газонепроницаемый шприц (*5*) с цилиндрическим стеклянным корпусом с нанесенной шкалой градуировки, шток-поршнем и съемной иглой.

В лабораторных условиях пробы при необходимости разбавлялись атмосферным воздухом через регулятор (*6*). Содержание изотопов углерода в подготовленных пробах определялось с помощью анализатора (*7*) изотопного состава DLT-100 (MCIA) методом резонансно-усиленной спектроскопии поглощения. Газ подавался в прибор через устройство ввода (*8*). Результаты измерений выводились на цифровой дисплей (*9*).

Измерения с помощью газоанализатора выполнялись в следующих режимах:

• стандартный режим подачи газа при помощи шприца для образцов с содержанием метана менее 1%. Анализируемый объем газовой пробы — 25 см^3;

• фиксированный режим разбавления газа для образцов с концентрацией

метана 1÷10%. Анализируемый объем газовой пробы — 10 см³ с 10-кратным разбавлением пробы;

• двухступенчатый режим разбавления газа для образцов с содержанием метана 10÷100% путем добавления в шприц с исходной пробой 1,5 см³ воздуха объемом 15 см³ и последующей подачей пробы с фиксированным 100-кратным разбавлением пробы.

В зависимости от содержания метана в исследуемой метановоздушной смеси выбирался один из режимов, выполнялись измерения содержания изотопов ^{12}C, ^{13}C и концентрации метана. На основе анализа результатов выпол-

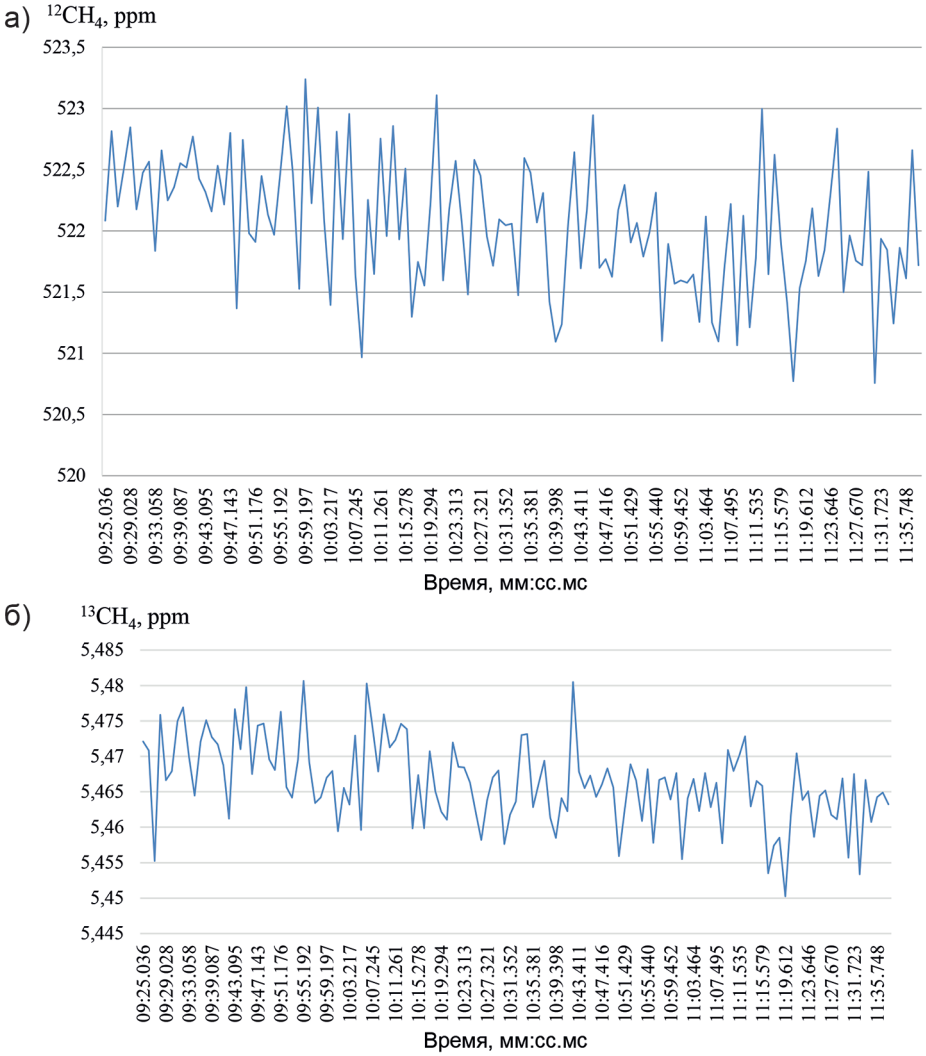


Рис. 2. Изменение содержание изотопов углерода шахтного метана рудничной атмосферы во времени, зарегистрированное при подаче проб газа в измерительный тракт газоанализатора DLT-100 (MCIA): ^{12}C (а); ^{13}C (б)

Fig. 2. Variation over time in the carbon isotope content of mine methane in the mine atmosphere recorded during the injection of gas samples into the measuring path of the DLT-100 (MCIA) gas analyzer: ^{12}C (a); ^{13}C (b)

ненных измерений легких изотопов метана определялась изотопная сигнатура $\delta^{13}C$.

Результаты измерений

На семи действующих шахтах Кузбасса отобраны пробы газа из 14 угольных кернов и 17 образцов рудничного воздуха, в которых измерены содержание изотопов ^{12}C, ^{13}C и концентрация метана. Примеры выполненных измерений содержания легких изотопов углерода метана при прокачке отобранных проб газа через измерительный тракт анализатора DLT-100 (MCIA) представлены на рис. 2. Анализ полученных результатов измерений приведен в табл. 1. Установлено, что изотопная сигнатура метана, содержащегося в рудничной атмосфере, отличается от значений, зарегистрированных в пробах угля, и характеризуется более высокой долей углерода ^{12}C. Это свидетельствует о присутствии разнообразных групп микроорганизмов в угольной среде и их метаболической роли в биогеохимической динамике [17].

Биогенные процессы метаногенеза

Согласно изотопным критериям [18], биогенный метан является изотопно-легким ($\delta^{13}C \leqslant -50‰$), тогда как термогенный — более тяжелым ($\delta^{13}C \geqslant -50‰$). На этом основании установлено, что 65% проб рудничной атмосферы (см. табл. 1) относятся к биогенным. В [8] установлено, что с ростом глубины залегания угольных пластов содержание легкого изотопа ^{12}C в шахтном метане снижается. Этим, вероятно, объясняются более высокие значения изотопной сигнатуры $\delta^{13}C$, зарегистрированные в отдельных пробах метана с меньших глубин.

Биогенный метан образуется при разложении органического вещества вследствие жизнедеятельности микроорганиз-

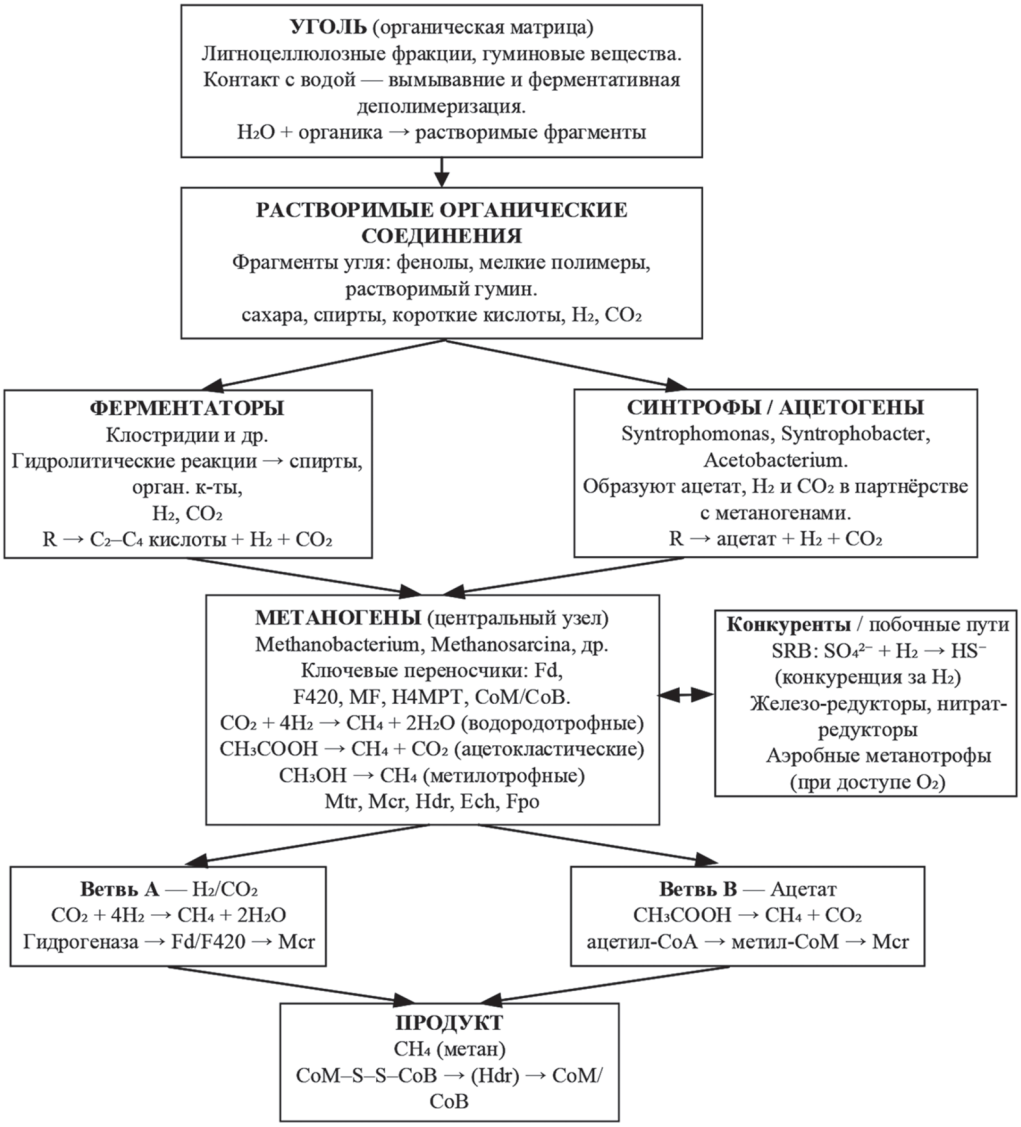
Таблица 1

Содержание изотопов углерода шахтного метана в пробах угля и рудничной атмосфере
Carbon isotope content of coal mine methane in coal samples and the mine atmosphere

Номер пробы	^{12}C, ppm	^{13}C, ppm	$\delta^{13}C$, ‰
Уголь			
1	761,5	8,1	–45,2
2	6735,8	72,2	–45,3
3	5301,5	56,5	–50,8
4	4391,5	46,9	–49,8
5	3962,3	42,4	–46,0
6	3520,8	37,0	–63,6
7	5680,0	60,4	–53,8
8	1932,00	20,37	–61,8
9	5155,5	54,4	–60,3
10	2578,7	27,5	–49,2
11	436,3	4,4	–42,4
12	2352,7	25,2	–44,3
13	427,7	4,5	–49,3
14	7358,0	78,5	–51,0
Рудничный воздух			
1	474,2	4,8	–87,22
2	1539,4	16,5	–45,3
3	1578,3	16,9	–44,5
4	1251,3	13,4	–43,2
5	1641,2	17,6	–42,4
6	65,3	0,7	–45,0
7	432,4	4,5	–63,0
8	522,0	5,5	–64,6
9	1697,14	17,94	–58,2
10	25,2	0,3	–30,3
11	101,5	1,1	–55,0
12	4348,0	46,3	–52,2
13	4498,0	47,8	–53,6
14	3515,4	37,3	–54,4
15	908,5	9,6	–54,7
16	1008,0	10,7	–54,4
17	905,5	9,6	–54,4

мов, относящихся к родам Methanococcus, Methanogenium, Methanococcoides, Methanobacterium, Methanosarcina, Methanospirillum [10, 11, 15, 19], и содержит более легкие изотопы углерода-12. Основными процессами естественного образования биогенного метана с участием микроорганизмов являются ферментация ацетата и CO_2 — редукция.

На рис. 3 представлены метилотрофный и ацетокластический пути метаногенеза, которые включают растворение и гидролиз органических соединений, ацидогенез и метаногенез. Заметим, что



стрелки – потоки субстратов/энергии; MF, H_4MPT, CoM/CoB – ключевые переносчики;
M_{cr} – ключевой фермент редукции метил-CoM → CH_4

Рис. 3. Обобщенная схема ацетокластического и метилотрофного путей метаногенеза
Fig. 3. Generalized scheme of the acetoclastic and methylotrophic methanogenesis pathways

в процессе биометаногенеза участвуют микробиоценотические сообщества бактерий, состоящие из трех групп. При этом анаэробные бактерии превращают сложные органические субстраты в масляную, пропионовую и молочную кислоты; ацетогеные бактерии участвуют в образовании уксусной кислоты, водорода и углекислого газа из масляной, пропионовой и молочных кислот, а затем метанообразующие бактерии восстанавливают углекислый газ в метан с поглощением водорода, который в противном случае может ингибировать жизнедеятельность уксуснокислых бактерий [20].

Биометаногенез включает в себя несколько этапов, один из которых гидролиз, который осуществляется под действием воды и гидролитических бактерий (Thauera, Geobacter, Pseudomonas). Этому процессу сопутствует биоконверсия — разрушение сложных структур угля до простых ароматических соединений и алканов. Следующий этап включает в себя ацидогенез, который характеризуется ферментацией, при помощи ацидогенных бактерий (Actinobacteria, Firmicutes, Bacteroidetes, Spirochaetes), продуктов гидролиза в летучие жирные кислоты (уксусная, масляная и др.). Группы ацидогенных бактерий конвертируют промежуточные продукты до CH_3COO^-, H_2 и CO_2. Синтез ацетата из газообразных субстратов (CO_2 и H_2) осуществляется некоторыми бактериями семейства Synergistaceae и рода Sedimentibacter по редуктивному пути Вуд–Люнкегальда, где эти газы восстанавливаются до ацетил-КоА, который затем конвертируется в ацетат [19]. Конечным этапом в данной цепочке является метаногенез, на котором метаногенные археи превращают ацетат, H_2/CO_2 и метилированные соединения в CH_4. Например, Methanosarcina и Methanosaeta используют ацетат — ацетокластный метаногенез, а Methanobacterium, Methanoculleus и Methanocalculus — $H_2 + CO_2$ — водородотрофный метаногенез. Помимо вышеописанного процесса, некоторые археи, например метилотрофы Methanolobus и Methanofastidiosum, способны перевести метанол и другие однокарбоновые субстраты в метан. Также в метаногенезе угля Methanobacterium и Methanoculleus редуцируют CO_2 до CH_4, Methanosaeta расщепляет уксусную кислоту, а Methanosarcina/Methanofastidiosum преобразуют метилированные соединения в метан [21, 22].

Кинетика метаногенеза в процессе гидролиза, который является основным лимитирующим фактором биометаногенеза, удовлетворительно описывается уравнением первого порядка [23]

$$P(t) = P_{\max} \exp\left(-\exp\left(-k\left(t - t_{lag}\right)\right)\right), \quad (2)$$

где $P(t)$ — кумулятивное накопление метана, л/г ОВ; t — время, сут.; P_{max} — максимальный выход метана, л/г ОВ; k — константа гидролиза, сут.$^{-1}$; t_{lag} — лаг-фаза, сут. Здесь ОВ — органическое вещество.

Максимальный суточный выход метана P_{max} определялся на основе формулы Бусвелла, которая описывает молярный выход метана [23]:

$$V_{CH_4} = \frac{4C + H - 2O - 3N - 2S}{8}, \quad (3)$$

где C, H, O, N, S — число атомов углерода, водорода, кислорода, азота и серы в молекуле угля.

Рассмотрены антрацит, коксующийся, энергетический и бурый угли. Исходные параметры и результаты расчетов P_{max} приведены в табл. 2.

Расчетные P_{max} (см. табл. 2) представляют собой предельные значения этого показателя. Учитывая низкую биодоступность углерода, содержащегося в угле, в дальнейших расчетах применен

Таблица 2

Максимальный суточный выход метана P_{max} для различных марок угля
Maximum daily methane yield (P_{max}) for different coal ranks

Марка угля	Состав	Параметры стехиометрии	Формула Бусвелла	Максимальный суточный выход метана P_{max}, л/г ОВ
Бурый уголь (H/C ~0,8–1,0)	~65% C, 5% H, 25% O, 2% N, 3% зола	C = 65/12 ≈ 5,42; H = 5/1 = 5; O = 25/16 ≈ 1,56; N = 2/14 ≈ 0,14	V_{CH_4} = (4×5,42+5–2×1,56––3×0,14)/8 ≈ (21,68 + 5––3,12–0,42)/8 ≈ 23,14/8 ≈ ≈ 2,89 моль/100 г	0,647
Энергетический уголь (H/C ~0,6–0,8)	~75% C, 4,5% H, 15% O, 1,5% N, 4% зола	C = 75/12 ≈ 6,25; H = 4,5; O = 15/16 ≈ 0,94; N = 1,5/14 ≈ 0,11	V_{CH_4} = (4×6,25+4,5––2×0,94–3×0,11)/8 ≈ ≈(25+4,5–1,88–0,33)/8 ≈ ≈27,29/8 ≈ 3,41 моль/100 г	0,764
Коксующийся уголь (H/C ~0,5–0,6)	~85% C, 4% H, 8% O, 1% N, 2% зола	C = 85/12 ≈ 7,08; H = 4; O = 8/16 = 0,5; N = 1/14 ≈ 0,07	V_{CH_4} = (4×7,08 + 4–2×0,5––3×0,07)/8 ≈ (28,32+4––1–0,21)/8 ≈ 31,11/8 ≈ ≈ 3,89 моль/100 г	0,871
Антрацит (H/C ~0,3–0,4)	~92% C, 2,5% H, 3% O, 0,5% N, 2% зола	C = 92/12 ≈ 7,67; H = 2,5; O = 3/16 ≈ 0,19; N = 0,5/14 ≈ 0,036	V_{CH_4} = (4×7,67+2,5––2×0,19–3×0,036)/8 ≈ ≈(30,68+2,5–0,38–0,11)/8≈ ≈32,69/8 ≈ 4,09 моль/100 г	0,916

понижающий безразмерный коэффициент биодоступности углерода $f_{bio} = 10^{-3}$ на основе экспериментальных данных [23, 24]. Лаг-фаза t_{lag} представляет собой начальный период в процессе метаногенеза, когда производство метана минимально или отсутствует, несмотря на наличие субстрата и бактерий. Физически это время, необходимое для адаптации метаногенных бактерий к новым условиям среды, так как бактерии должны активировать ферментативные пути, синтезировать необходимые белки и энзимы для метаногенеза. При этом в анаэробных системах продолжительность лаг-фазы может быть длиннее из-за присутствия токсичных веществ или низкой температуры в среде для метаногенных бактерий.

На рис. 4 представлены результаты оценки кумулятивного образования метана $P(t)$ для углей различной степени метаморфизма при лаг-фазе t_{lag} 5 сут., константе гидролиза k = 0,15 сут.$^{-1}$, максимального суточного выхода метана P_{max}, приведенного в табл. 2, и коэффициента биодоступности $f_{bio} = 10^{-3}$.

Обсуждение

На основе изучения изотопии углерода шахтного метана экспериментально подтверждено влияние биогенных процессов метаногенеза на формирование газового баланса угольных шахт. Заметим, что представленные результаты получены для условий рабочих угольных пластов. Закономерности генерации и накопления биогенного метана в пластах-спутниках не рассматривались и являются предметом дальнейших исследований.

В натурных измерениях показано, что для условий Кузбасса в 65% проб рудничной атмосферы метан имеет биогенное

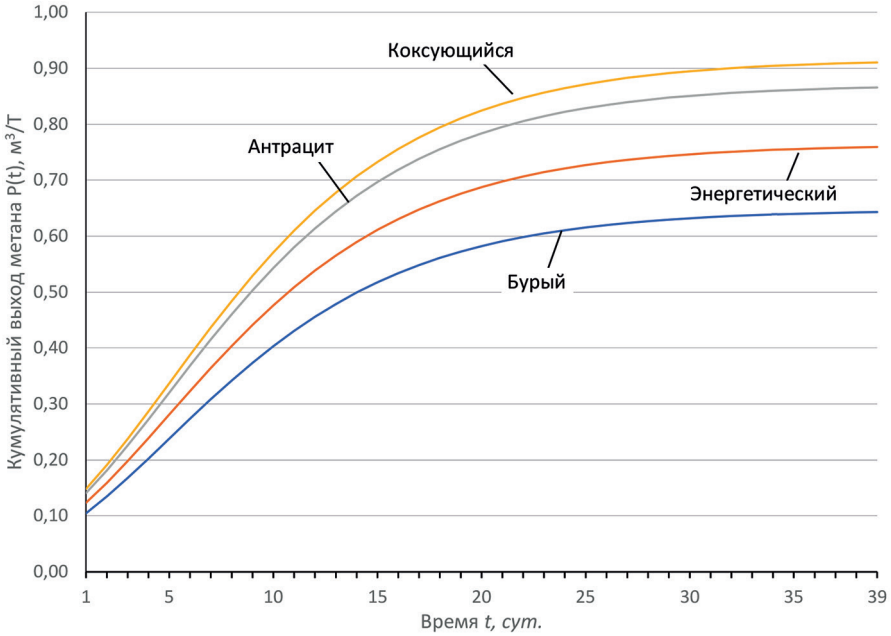


Рис. 4. Кумулятивное образование метана P(t) во времени t для углей различной степени метаморфизма
Fig. 4. Cumulative methane production P(t) over time t for coals of various metamorphic ranks

происхождение (значения $\delta^{13}C \leqslant -50‰$). Таким образом, в горных выработках содержание метана формируется не только за счет физической десорбции термогенного метана из разрабатываемого пласта, но и в результате активной микробиологической деятельности в угле и вмещающих породах. Более легкий изотопный состав углерода (преобладание ^{12}C) в шахтном метане по сравнению с газом, десорбируемым непосредственно из угольных кернов, свидетельствует о наличии дополнительного, биогенного источника.

Полученные данные подтверждают гипотезу о том, что в шахтных условиях непрерывно протекают процессы биогенного метаногенеза, которые обусловливают формирование метанообильности угольной шахты до 1 м³/т метана. При этом влияние на газовый баланс шахты биометаногенеза проявляется в нескольких аспектах. Биометаногенез создает постоянный фоновый приток метана в выработки, не зависящий от скорости подвигания очистного забоя и зон дегазации. Это особенно актуально для выработанных пространств и обводненных участков пластов, где создаются благоприятные условия для микроорганизмов. В отличие от одномоментной десорбции термогенного метана, биологическое образование метана — непрерывный процесс. Это может приводить к неожиданному росту концентраций метана на исходящей струе выемочного участка спустя длительное время после прекращения основных горных работ. Активность микробных сообществ и, следовательно, интенсивность биогенного газовыделения зависит от геологических и гидрологических условий, таких как степень метаморфизма угля, температура, доступность воды и биодоступного субстрата. Это усложняет прогноз газовой обстановки, требуя учета локальных факторов. Также после закрытия шахты биогенные процессы

могут продолжаться, поддерживая миграцию метана в приповерхностные слои и его выход в атмосферу, что имеет значение для оценки экологического следа угледобычи.

Выводы

В выполненных исследованиях количественно оценен потенциал биогенного газовыделения. На основании разработанной кинетической модели с использованием формулы Бусвелла и введенного коэффициента биодоступности углерода (f_{bio} = 10^{-3}) рассчитаны теоретически возможные объемы кумулятивного образования биогенного метана для углей различной степени метаморфизма. Показано, что непрерывно протекающие в шахтных условиях процессы биометаногенеза могут обусловливать содержание до 1 м^3/т биогенного метана в метанообильности угольной шахты. Установлены особенности биогенного газовыделения, принципиально отличающие его от термогенного и заключающиеся в его непрерывном и относительно постоянном во времени характере. В отличие от одномоментной десорбции термогенного метана, связанной с нарушением пласта, биологическое образование газа представляет собой постоянный фоновый процесс. Это создает долгосрочный источник метана, который может проявляться после прекращения основных горных работ, особенно в выработанных пространствах и обводненных участках, что является важным фактором для оценки рисков, как при эксплуатации, так и после закрытия шахт.

Определены основные факторы, влияющие на интенсивность биометаногенеза. Процесс имеет сложную зависимость от совокупности геологических, гидрологических и микробиологических условий. Интенсивность газовыделения лимитируется, прежде всего, стадией гидролиза органического вещества угля, а также такими параметрами, как степень метаморфизма угля (марка), температура, наличие свободной воды, доступность биодеградируемого субстрата и адаптационный период (лаг-фаза) метаногенных архей. Эта многопараметрическая зависимость объясняет пространственную и временную неоднородность биогенного газовыделения и подчеркивает необходимость локализованного подхода к его оценке.

Таким образом, результаты работы обосновывают целесообразность развития подходов к моделированию газового баланса угольных шахт для повышения точности прогнозирования газовой обстановки, совершенствования систем дегазации и обеспечения промышленной безопасности с учетом биогенной составляющей. Дальнейшие исследования должны быть направлены на детальное картирование и локализацию биологических процессов в угольных пластах, изучение факторов, стимулирующих или ингибирующих активность микробиоценозов, и интеграцию полученных данных в комплексные гидрогазодинамические модели шахтных полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ларин М. К.*, *Розум И. Г.*, *Бушуев К. И.* Виды и причины газодинамических явлений на угольных шахтах // Вестник СибГИУ. — 2019. — № 4. — С. 25 — 27.

2. *Корчагина Т. В.*, *Ефимова Н. В.*, *Жабин А. Б.*, *Ишутина С. А.* Исследование эмиссии угольного метана на поверхность из ликвидируемых шахт // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2017. — № 4. — С. 48 — 60.

3. *Чжан Яньцзе*, *Колесник Ю. И.* Современные технологии добычи метана в Китае из угольных пластов: тенденции и перспективы развития // Baikal Research Journal. — 2022. — № 2.

4. *Айруни А. В.* Метан в угольных пластах: гипотезы и экспериментальные данные. — М.: Недра, 1975. — 256 с.

5. *Полевщиков Г. Я.*, *Козырева Е. Н.*, *Плаксин М. С.*, *Рябцев А. А.*, *Родин Р. И.*, *Непеина Е. С.* Натурные измерения энергетических показателей выделения метана из газоносного угля // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2016. — № 3. — С. 400—406.

6. *Полевщиков Г. Я.*, *Козырева Е. Н.*, *Непеина Е. С.*, *Рябцев А. А.*, *Родин Р. И.* Изучение газокинетических характеристик угольных пластов Кузбасса // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2017. — № 2. — С. 18—30.

7. *Алексеев Ф. А.*, *Лебедев В. С.*, *Овсянников В. М.* Изотопный состав углерода газов биохимического происхождения. — М.: Недра, 1973. — 88 с.

8. *Тайлаков О. В.*, *Салтымаков Е. А.*, *Соколов С. В.*, *Костина А. В.*, *Проценко Г. В.* Определение источников метановыделения в очистной забой угольных шахт анализом изотопного состава углерода метана // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2024. — № 5. — С. 133—140. DOI: 10.15372/FTPRPI20240512.

9. *Meslé M., Oger P., Dromart G.* Microbial methanogenesis in subsurface oil and coal // Research in Microbiology. 2013, vol. 164, no. 9, pp. 959—972.

10. *Akimbekov N. S.*, *Digel I.*, *Tastambek K. T.*, *Marat A. K.*, *Turaliyeva M. A.*, *Kaiyrmanova G. K.* Biotechnology of microorganisms from coal environments: from environmental remediation to energy production // Biology. 2022, vol. 11, no. 9, article 1306. DOI: 10.3390/biology11091306.

11. *Zhang B., Tao Sh., Sun B., Tang Sh., Chen Sh., Wen Y., Ye J.* Genesis and accumulation mechanism of external gas in deep coal seams of the Baijiahai uplift, Junggar Basin, China // International Journal of Coal Geology. 2024, vol. 286 article 104506. DOI: 10.1016/j.coal.2024.104506.

12. *Rice D. D.* Composition and origins of coalbed gas // AAPG Studies in Geology. 1993, vol. 38, pp. 159—184.

13. *Colosimo F., Thomas R., Lloyd J. R., Taylor K. G., Boothman C., Smith A. D., Lord R., Kalin R. M.* Biogenic methane in shale gas and coal bed methane: A review of current knowledge and gaps // International Journal of Coal Geology. 2016, vol. 165, pp. 106—120. DOI: 10.1016/j.coal.2016.08.011.

14. *Schoell M.* Genetic Characterization of Natural Gases // AAPG Bulletin. 1983, vol. 67, no. 12, pp. 2225—2238.

15. *Beckmann S., Lueders T., Krüger M., von Netzer F., Engelen B., Cypionka H.* Acetogens and acetoclastic Methanosarcinales govern methane formation in abandoned coal mines // Applied and Environmental Microbiology. 2011, vol. 77, no. 11, pp. 3749—3756. DOI: 10.1128/AEM.02818-10.

16. *Tailakov O. V.*, *Kormin A. N.*, *Zastrelov D. N.*, *Utkaev E. A.*, *Sokolov S. V.* Justification of a method for determination of gas content in coal seams to assess degasification efficiency / The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in 21st Century: Mining, Processing and Safety. 2016, pp. 324—329.

17. *Whiticar M. J.* Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // Chemical Geology. 1999, vol. 161, no. 1—3, pp. 291—314.

18. *Елисеев А. В.* Глобальный цикл метана: обзор // Фундаментальная и прикладная климатология. — 2018. — Т. 1. — С. 52—70. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-52-70.

19. *Barnes R., Goldberg E.* Methane production and consumption in anoxic marine sediments // Geology. 1976, vol. 4, no. 5, pp. 297—300.

20. *Wang L., Su X., Zhao W., Xia D., Wang Q.* Enhancement of biomethane production from coal by supercritical CO_2 extraction // Journal of CO2 Utilization. 2023, vol. 74, article 102545

21. *Su X., Zhao W., Xia D.* The diversity of hydrogen-producing bacteria and methanogens within an in situ coal seam // Biotechnology for Biofuels. 2018, vol. 11, no. 1, article 245.

22. *Литти Ю. В.*, *Ковалев Д. А.*, *Ковалев А. А.*, *Катраева И. В.*, *Ножевникова А. Н.* Использование аппарата вихревого слоя для повышения эффективности метанового сбраживания органических отходов // Актуальная биотехнология. — 2019. — № 3 (30). — С. 465—470.

23. *Park S. Y.*, *Liang Y.* Biogenic methane production from coal: A review on recent applications and future prospects // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019, vol. 115, article 109363. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109363.

24. *Nagarajan S.*, *Ranade V. V.* Valorizing waste biomass via hydrodynamic cavitation and anaerobic digestion // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2021, vol. 60, no. 46, pp. 16577—16598. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c03177. ГИАБ

REFERENCES

1. Larin M. K., Rozum I. G., Bushuev K. I. Types and causes of gas-dynamic phenomena in coal mines. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2019, no. 4, pp. 25 — 27. [In Russ].

2. Korchagina T. V., Efimova N. V., Zhabin A. B., Ishutina S. A. Study of coal methane emission to the surface from closed mines. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2017, no. 4, pp. 48 — 60. [In Russ].

3. Zhang Yanjie, Kolesnik Yu. I. Modern technologies of coalbed methane production in China: trends and development prospects. *Baikal Research Journal*. 2022, no. 2. [In Russ].

4. Ayruni A. V. *Metan v ugol'nykh plastakh: gipotezy i eksperimental'nye dannye* [Methane in coal seams: hypotheses and experimental data], Moscow, Nedra, 1975, 256 p.

5. Polevshchikov G. Ya., Kozyreva E. N., Plaksin M. S., Ryabtsev A. A., Rodin R. I., Nepeina E. S. Field measurements of energy indicators of methane emission from gas-bearing coal. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2016, no. 3, pp. 400 — 406. [In Russ].

6. Polevshchikov G. Ya., Kozyreva E. N., Nepeina E. S., Ryabtsev A. A., Rodin R. I. Study of gas-kinetic characteristics of coal seams in Kuzbass. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2017, no. 2, pp. 18 — 30. [In Russ].

7. Alekseev F. A., Lebedev V. S., Ovsyannikov V. M. *Izotopniy sostav ugleroda gazov biokhimicheskogo proiskhozhdeniya* [Carbon isotope composition of gases of biochemical origin], Moscow, Nedra, 1973, 88 p.

8. Tailakov O. V., Saltymakov E. A., Sokolov S. V., Kostina A. V., Protsenko G. V. Identification of methane sources in the working face of coal mines by analysis of methane carbon isotope composition. *Journal of Mining Sciences*. 2024, no. 5, pp. 133 — 140. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20240512.

9. Meslé M., Oger P., Dromart G. Microbial methanogenesis in subsurface oil and coal. *Research in Microbiology*. 2013, vol. 164, no. 9, pp. 959 — 972.

10. Akimbekov N. S., Digel I., Tastambek K. T., Marat A. K., Turaliyeva M. A., Kaiyrmanova G. K. Biotechnology of microorganisms from coal environments: from environmental remediation to energy production. *Biology*. 2022, vol. 11, no. 9, article 1306. DOI: 10.3390/biology11091306.

11. Zhang B., Tao Sh., Sun B., Tang Sh., Chen Sh., Wen Y., Ye J. Genesis and accumulation mechanism of external gas in deep coal seams of the Baijiahai uplift, Junggar Basin, China. *International Journal of Coal Geology*. 2024, vol. 286 article 104506. DOI: 10.1016/j.coal.2024.104506.

12. Rice D. D. Composition and origins of coalbed gas. *AAPG Studies in Geology*. 1993, vol. 38, pp. 159 — 184.

13. Colosimo F., Thomas R., Lloyd J. R., Taylor K. G., Boothman C., Smith A. D., Lord R., Kalin R. M. Biogenic methane in shale gas and coal bed methane: A review of current knowledge and gaps. *International Journal of Coal Geology*. 2016, vol. 165, pp. 106 — 120. DOI: 10.1016/j.coal.2016.08.011.

14. Schoell M. Genetic Characterization of Natural Gases. *AAPG Bulletin*. 1983, vol. 67, no. 12, pp. 2225 — 2238.

15. Beckmann S., Lueders T., Krüger M., von Netzer F., Engelen B., Cypionka H. Acetogens and acetoclastic Methanosarcinales govern methane formation in abandoned coal mines. *Applied and Environmental Microbiology*. 2011, vol. 77, no. 11, pp. 3749 — 3756. DOI: 10.1128/AEM.02818-10.

16. Tailakov O. V., Kormin A. N., Zastrelov D. N., Utkaev E. A., Sokolov S. V. Justification of a method for determination of gas content in coal seams to assess degasification efficiency. *The 8th Russian-Chinese Symposium. Coal in 21st Century: Mining, Processing and Safety*. 2016, pp. 324 — 329.

17. Whiticar M. J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. *Chemical Geology*. 1999, vol. 161, no. 1 — 3, pp. 291 — 314.

18. Eliseev A. V. Global methane cycle: a review. *Fundamental and applied climatology*. 2018, vol. 1, pp. 52 — 70. [In Russ]. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-52-70.

19. Barnes R., Goldberg E. Methane production and consumption in anoxic marine sediments. *Geology*. 1976, vol. 4, no. 5, pp. 297 — 300.

20. Wang L., Su X., Zhao W., Xia D., Wang Q. Enhancement of biomethane production from coal by supercritical CO_2 extraction. *Journal of CO2 Utilization*. 2023, vol. 74, article 102545

21. Su X., Zhao W., Xia D. The diversity of hydrogen-producing bacteria and methanogens within an in situ coal seam. *Biotechnology for Biofuels*. 2018, vol. 11, no. 1, article 245.

22. Litti Yu. V., Kovalev D. A., Kovalev A. A., Katraeva I. V., Nozhevnikova A. N. Application of vortex layer apparatus for increasing the efficiency of methane fermentation of organic waste. *Actual Biotechnology*. 2019, no. 3 (30), pp. 465 — 470. [In Russ].

23. Park S. Y., Liang Y. Biogenic methane production from coal: A review on recent applications and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, vol. 115, article 109363. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109363.

24. Nagarajan S., Ranade V. V. Valorizing waste biomass via hydrodynamic cavitation and anaerobic digestion. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2021, vol. 60, no. 46, pp. 16577 — 16598. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c03177.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тайлаков Олег Владимирович — д-р техн. наук, профессор,
Генеральный директор, АО «Научный центр ВостНИИ
по промышленной и экологической безопасности
в горной отрасли», e-mail: tailakov@nc-vostnii.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5046-0476,
Уткаев Евгений Александрович[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: utkaev@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8299-1327,
Тайлаков Александр Александрович[1] — инженер,
e-mail: Aleksandr.tailakov@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4593-5443,
Рябцев Андрей Александрович[1] — научный сотрудник,
e-mail: iu@ficuuh.ru, ORCID ID: 0000-0001-6764-3607,
[1] Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук, Институт угля.
Для контактов: Тайлаков О.В., e-mail: tailakov@nc-vostnii.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

O.V. Tailakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
General Director, Scientific Center VostNII for Industrial
and Environmental Safety in Mining Industry,
Kemerovo, Russia, e-mail: tailakov@nc-vostnii.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5046-0476,
E.A. Utkaev[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: utkaev@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8299-1327,
A.A. Tailakov[1], Engineer, e-mail: Aleksandr.tailakov@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4593-5443,
A.A. Ryabtsev[1], Researcher, e-mail: iu@ficuuh.ru,
ORCID ID: 0000-0001-6764-3607,
[1] Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry
of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russia.
Corresponding author: O.V. Tailakov, e-mail: tailakov@nc-vostnii.ru.

Получена редакцией 26.12.2025; получена после рецензии 24.02.2026; принята к печати 10.05.2026.
Received by the editors 26.12.2025; received after the review 24.02.2026; accepted for printing 10.05.2026.