

## РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.817.4, 550.423

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ В ОЧИСТНОЙ ЗАБОЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ АНАЛИЗОМ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА УГЛЕРОДА МЕТАНА

**О. В. Тайлаков, Е. А. Салтымаков, С. В. Соколов, А. В. Костина, Г. В. Проценко**

*Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,  
E-mail: oleg2579@gmail.com, easaltymakov@yandex.ru, sokoloviu.s@yandex.ru,  
chernetskaya.nastasya@mail.ru, protsenko0-galina@yandex.ru,  
просп. Ленинградский, 10, 650065, г. Кемерово, Россия*

Предложен и опробован комплексный подход к оценке зоны влияния углепородного массива на очистной забой по газовому фактору, основанный на изучении изотопии шахтного метана. Установлено количественное соотношение изотопов углерода метана в угольной пробе и рудничной атмосфере в условиях семи действующих шахт Кузбасса. Определены геометрические параметры рассматриваемых зон, а также максимальное значение объема метана, которое может оказать нагрузку на очистной забой в ходе отработки выемочного участка. Показано существенное отличие объема газа и параметров зоны миграции метана при общепринятом и комплексном подходах с применением метода оценки изотопного состава углерода метана в рудничной атмосфере и угле рабочего горизонта.

*Очистной забой, угольный пласт, миграция, фильтрационные свойства, метан, изотопия, ресурсы метана, пласты-спутники*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240512  
EDN: NCMFLL

С развитием подземных горных работ увеличивается глубина их проведения, что сопровождается ростом газоносности угольных пластов. При этом газовый фактор ограничивает нагрузку на очистной забой и предопределяет необходимость совершенствования технологий и оборудования вентиляции горных выработок и дегазации угольных шахт с учетом газового баланса очистных и подготовительных участков, обусловленного массопереносом метана в шахтную атмосферу из рабочего пласта и пластов-спутников [1 – 3]. В зависимости от филь-

---

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ СО РАН (проект FWEZ-2024-0013) “Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений, 2024 – 2025 гг.” (рег. № 124041100071-9).

традиционных свойств углепородного массива, характера движения подземных вод и диффузионных процессов миграция метана может происходить на значительные расстояния из-за большой скорости его перехода из сорбированного состояния в свободное пространство угольной матрицы [4–7].

В соответствии с действующими нормативно-правовыми актами в области промышленной безопасности проведение дегазации обязательно при газоносности разрабатываемых угольных пластов более 9 м<sup>3</sup>/т. Необходимо также учитывать расстояние между разрабатываемым и сближенными пластами, которое для условий Кузбасса в среднем составляет 300 м для подрабатываемых и 35 м для надрабатываемых пластов относительно рабочего горизонта. На основе определения изотопного состава углерода метана с целью повышения эффективности дегазации выполнено исследование источников метановыделения на ряде шахт Кузбасса [8–11]. По мере старения исходного биологического материала и его химической трансформации происходит постепенное увеличение содержания <sup>13</sup>C [12], поэтому по изотопному составу углерода метана можно судить о происхождении газа и времени его образования [13–15].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Из рабочих пластов выбуривались угольные керны и размещались в герметичные сосуды, из которых затем отбирались пробы десорбированного метана [16–17]. Также выполнен отбор метановоздушной смеси (МВС) с применением газоотборного пакета с запирающим вентилем в комплекте с ручным насосом [18]. Всего отобраны 31 проба десорбированного метана из угольных образцов и 37 проб рудничного воздуха в девяти очистных забоях семи угольных шахт. В лабораторных условиях методом резонансно-усиленной спектроскопии поглощения с применением анализатора DLT-100 (MCIA) выполнено изучение содержания изотопов углерода метана в отобранных пробах. Определено смещение изотопного состава углерода метана  $\delta^{13}\text{C}$ , отклонение изотопной сигнатуры <sup>13</sup>C / <sup>12</sup>C от сигнатуры стандартного образца, выраженное в промилле:

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

где  $({}^{13}\text{C} / {}^{12}\text{C})^{\text{обр}}$  — отношение содержания <sup>13</sup>C и <sup>12</sup>C исследуемого образца;  $({}^{13}\text{C} / {}^{12}\text{C})^{\text{PDB}}$  — отношение содержания <sup>13</sup>C и <sup>12</sup>C стандартного образца морских окаменелостей мелового периода *Belemnitella Americana* формации Pee Dee в Южной Каролине (PDB).

На основе выполненных измерений установлено различие  $\delta^{13}\text{C}$  для проб метана, содержащегося в угле и МВС (рис. 1). При этом подтверждено наличие в рудничной атмосфере очистного забоя метана, который поступает из пластов-спутников посредством массопереноса. Отмечено, что на шахте № 1, выемочных участках 1 и 2 шахт № 2 и № 7 различие  $\delta^{13}\text{C}$  — незначительно, а на выемочном участке 2 шахты № 2 не наблюдается вовсе. Эти данные подтверждают отсутствие влияния на выемочный участок шахты № 2 метана отличного геологического возраста.

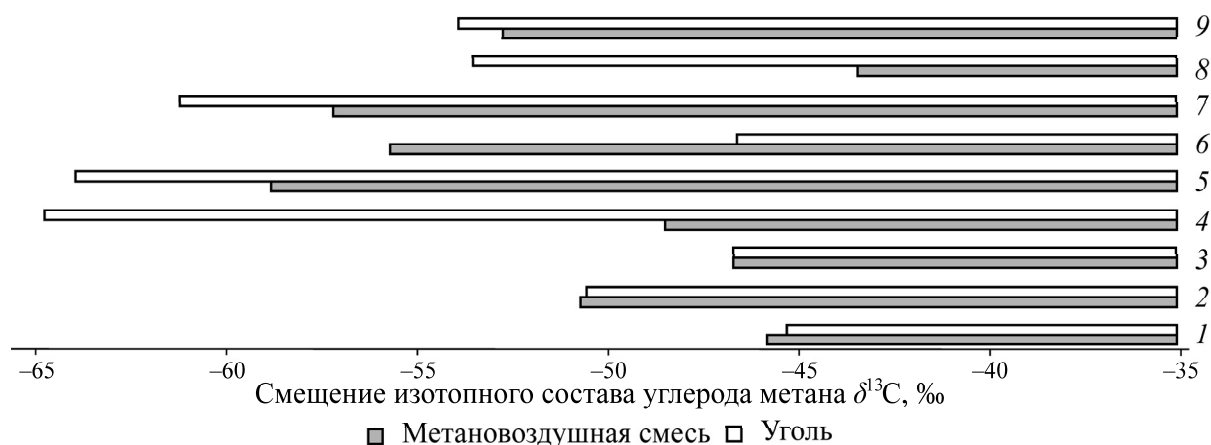


Рис. 1. Количественное соотношение изотопов углерода метана в угле и метановоздушной смеси: 1 — шахта № 1; 2 — шахта № 2, выемочный участок 1; 3 — шахта № 2, выемочный участок 2; 4 — шахта № 3; 5 — шахта № 4; 6 — шахта № 5; 7 — шахта № 6; 8 — шахта № 7, выемочный участок 1; 9 — шахта № 7, выемочный участок 2

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для выявления области влияния на рабочий горизонт по газовому фактору, а также определение ресурсов метана, который содержится в выделенном объеме, на первоначальном этапе выполнена оцифровка горно-графической документации путем преобразования растрового изображения горного отвода в векторизованную форму при помощи САД-систем. При необходимости выполнялось масштабирование для получения координат в единой размерности с использованием поправочного коэффициента:

$$k = \frac{d}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}, \quad (2)$$

где  $d$  — действительное расстояние между геологоразведочными скважинами с координатами  $(x_1, y_1)$  и  $(x_2, y_2)$ .

В рамках исследования на каждой шахте рассмотрена область действующего и планируемого выемочных участков (рис. 2). Из-за низкой плотности разведочной сети скважин вычисление значений мощности, плана газоносности, влажности, зольности и плотности угля выполнено методом интерполяции (рис. 3).

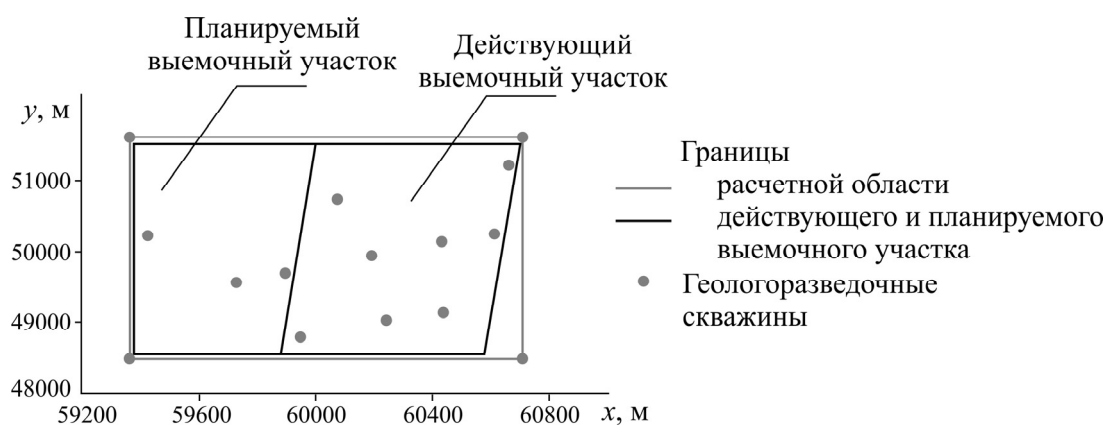


Рис. 2. Границы расчетного блока и расположения геологоразведочных скважин в координатах  $x$  и  $y$

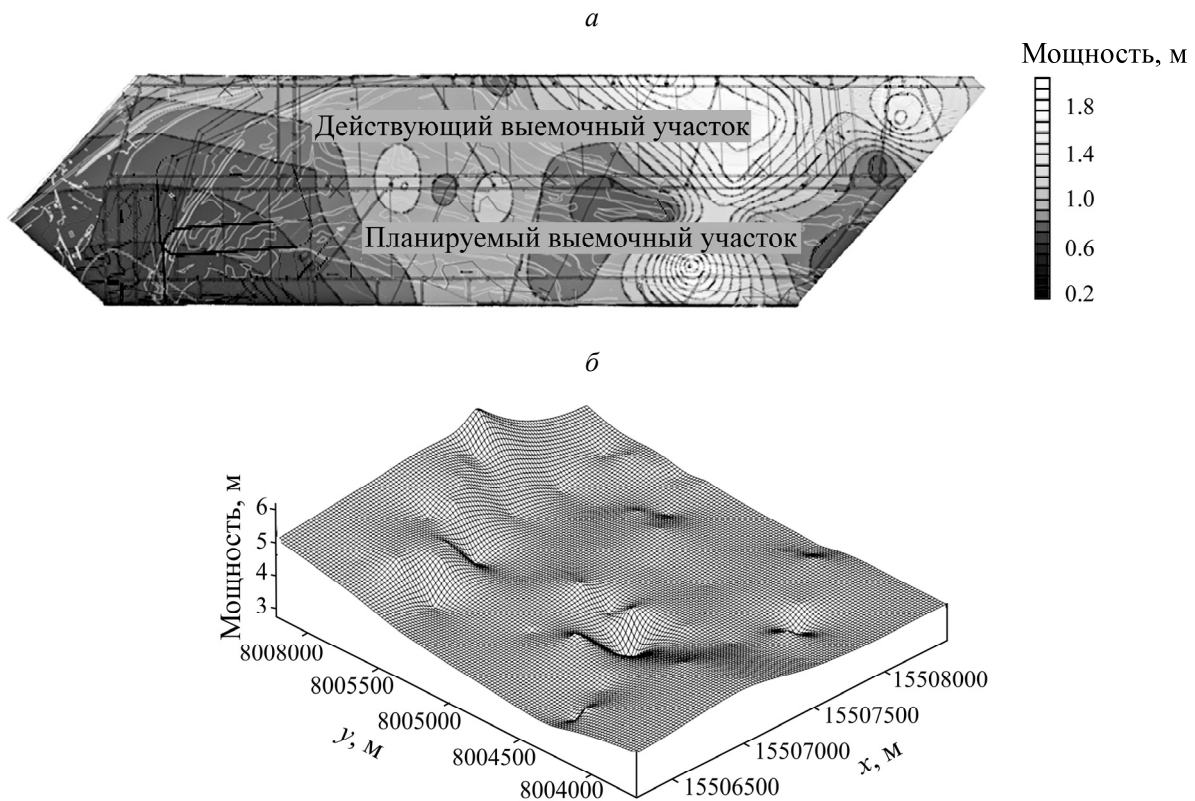


Рис. 3. Изменение мощности пласта-спутника А шахты № 2 (*a*) и пространственное распределение мощности рабочего угольного пласта шахты № 1 (*б*)

В [7, 19] получена зависимость усредненных значений смещения изотопного состава углерода метана  $\delta^{13}\text{C}$  от глубины залегания угольных пластов. В ходе проведения настоящих исследований эмпирическая зависимость была дополнена результатами измерений (рис. 4), уточненная формула приняла следующий вид:

$$\delta^{13}\text{C} = -1000 \cdot e^{-0.0065H}, \quad (3)$$

где  $H$  — глубина залегания угольного пласта, м.

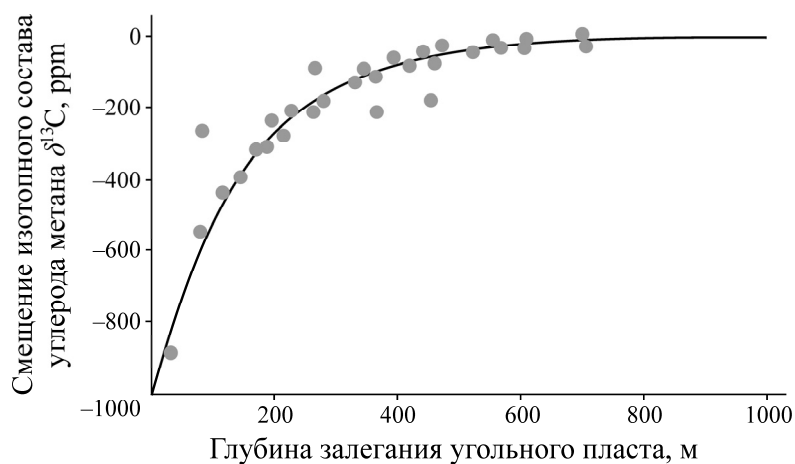


Рис. 4. Зависимость смещения изотопного состава углерода шахтного метана  $\delta^{13}\text{C}$  от глубины  $H$  залегания угольного пласта в условиях шахт Кузбасса

С учетом полученной зависимости (3) и формулы (1) выполнен расчет влияния на метановыделение вышележащих и нижележащих пластов-спутников для каждого выемочного участка семи шахт. На основе модели газового баланса выемочного участка описано формирование изотопного состава углерода шахтного метана в очистном забое при поступлении в него метана из  $i$  и  $j$  пластов-спутников:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{оч.з.}} = \left[ \frac{C_p^{12}V_p + \sum_{i=1}^N C_{\text{НП}i}^{12} \cdot V_{\text{НП}i} + \sum_{j=1}^K C_{\text{ВП}j}^{12} \cdot V_{\text{ВП}j}}{C_p^{13}V_p + \sum_{i=1}^N C_{\text{НП}i}^{13} \cdot V_{\text{НП}i} + \sum_{j=1}^K C_{\text{ВП}j}^{13} \cdot V_{\text{ВП}j}} \cdot 0.0112372 \right]^{-1} - 1 \cdot 1000, \quad (4)$$

$$\begin{cases} 0 \leq N \leq N_{\text{НП}}, \\ 0 \leq K \leq K_{\text{ВП}}, \\ N, K \in \mathbb{N}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $C_p$ ,  $C_{\text{НП}}$ ,  $C_{\text{ВП}}$  — изотопы углерода шахтного метана, выделившихся из разрабатываемого пласта, нижних и верхних пластов-спутников, ppm;  $V_p$ ,  $V_{\text{НП}}$ ,  $V_{\text{ВП}}$  — объем выделившегося метана из рабочей зоны, нижних и верхних пластов-спутников,  $\text{м}^3$ ;  $i = 1, \dots, N$ ,  $j = 1, \dots, K$  — количество нижележащих и вышележащих пластов-спутников, вовлеченных в формирование газового баланса очистного участка; “12”, “13” — индексы, соответствующие изотопам углерода-12 и углерода-13;  $N_{\text{НП}}$  и  $N_{\text{ВП}}$  — общее количество вышележащих и нижележащих пластов-спутников;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{оч.з.}}$  — смещение изотопного состава углерода метана очистного забоя, установленное в натурных наблюдениях в шахтных условиях.

Результаты оценки влияния пластов-спутников на основе модели (4), (5) представлены в таблице. Метан из пластов-спутников идентифицировался на основе зависимости (3), а количество пластов-спутников определялось с учетом выполнения равенства (4).

Оценка мощности блоков по анализу изотопного состава углерода метана

Номер шахты / выемочный участок	Количество пластов-спутников*		Мощность блока, м		Минимальное расхождение, %**
	Общепринятый подход	Комплексный подход	Общепринятый подход	Комплексный подход	
1	5 н.п.	1 в.п., 1 н.п.	157.22	131.66	1.72
2 / 1	6 в.п., 1 н.п.	15 в.п., 1 н.п.	205.75	371.45	4.79
2 / 2	6 в.п., 1 н.п.	13 в.п., 3 н.п.	216.57	350.0	0.48
3	8 в.п., 1 н.п.	1 в.п., 3 н.п.	247.14	116.15	1.31
4	6 в.п., 2 н.п.	5 н.п.	346.72	160.83	11.78
5	3 в.п., 1 н.п.	5 н.п.	290.84	375.84	1.01
6	6 в.п., 1 н.п.	6 в.п., 1 н.п.	335.02	328.74	2.40
7 / 1	6 в.п., 1 н.п.	5 в.п., 1 н.п.	298.67	328.90	10.35
7 / 2	7 в.п., 1 н.п.	3 в.п., 3 н.п.	335.93	200.63	4.33

\* в.п. — вышележащий пласт; н.п. — нижележащий пласт; \*\* по отношению к значению смещения изотопного состава углерода метана в исходящей струе очистного забоя.

На основании выполненных расчетов построены разрезы по простиранию действующего и планируемого выемочных участков (рис. 5). На разрезы вынесены области влияния пластов-спутников, вычисленные согласно действующей нормативной документации и комплексному подходу сопоставления измеренного и расчетного значений смещения изотопов углерода шахтного метана на исходящей струе выемочного участка. На примере разреза для шахты № 5 показано, что на очистной забой по газовому фактору оказывают влияние 5 нижележащих пластов. Результаты расчетов, представленные на рис. 5, подтверждаются низкой газоносностью вышележащих пластов-спутников (А, Б, В), попадающих в зону выветривания.

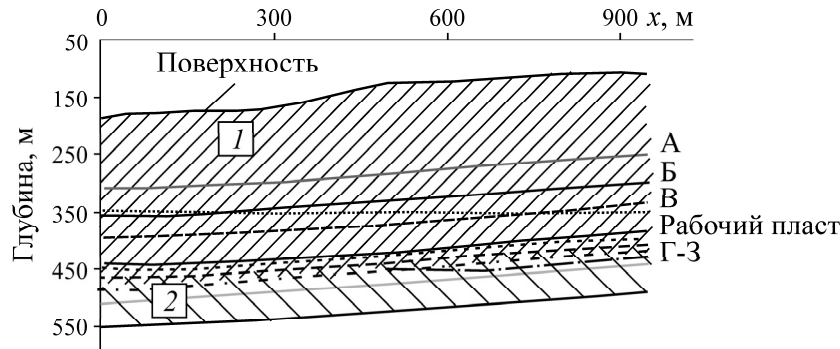


Рис. 5. Шахта № 5 с указанием зон влияния по газовому фактору, рассчитанных двумя методами: 1 — на основе рекомендаций по аэрологической безопасности угольных шахт; 2 — по определению изотопного состава углерода шахтного метана; А – З — пласты-спутники

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ

Для прогнозирования метановыделения выполнен расчет ресурсов метана в зонах 1 и 2 (рис. 5) с последующей разработкой рекомендаций по дегазации для рассматриваемых угольных шахт. Полученные распределения плотности угля  $\rho(x, y)$ , мощности  $m(x, y)$ , зольности  $A(x, y)$ , влажности  $W(x, y)$  и газоносности пласта  $\chi(x, y)$  в точках с координатами  $(x, y)$  использованы для расчета ресурсов метана  $i$ -ого угольного пласта  $f(x, y)$ , вычисленных как сумма ресурсов метана в пределах расчетного блока; вмещающих  $s_i$  — рассматриваемый угольный пласт (рис. 6):

$$f(x, y) = m(x, y)\rho(x, y)\chi(x, y)\left(1 - \frac{A(x, y) + W(x, y)}{100}\right), \quad (6)$$

$$V_i^{\text{пласт}} = \sum_{i=1}^n \iint_S f(x, y) dx dy, \quad (7)$$

где  $n$  — количество блоков в  $i$ -пласте;  $k$  — количество угольных пластов.

Заметим, что при подходе с использованием исследования изотопного состава углерода метана ресурсы газа, которые потенциально могут оказать влияние на действующий выемочный участок, оказываются выше. Для шахт № 3 и 7 (выемочный участок 1) ситуация противоположна описанному. Это связано с тем, что при разработанном подходе установленное количество вышележащих пластов было больше, а нижележащих — меньше, чем при расчете по общепринятому подходу. Кроме того, вышележащие пласты попадают в зону выветривания, в то время как у нижележащих пластов с увеличением глубины газоносность увеличивается.

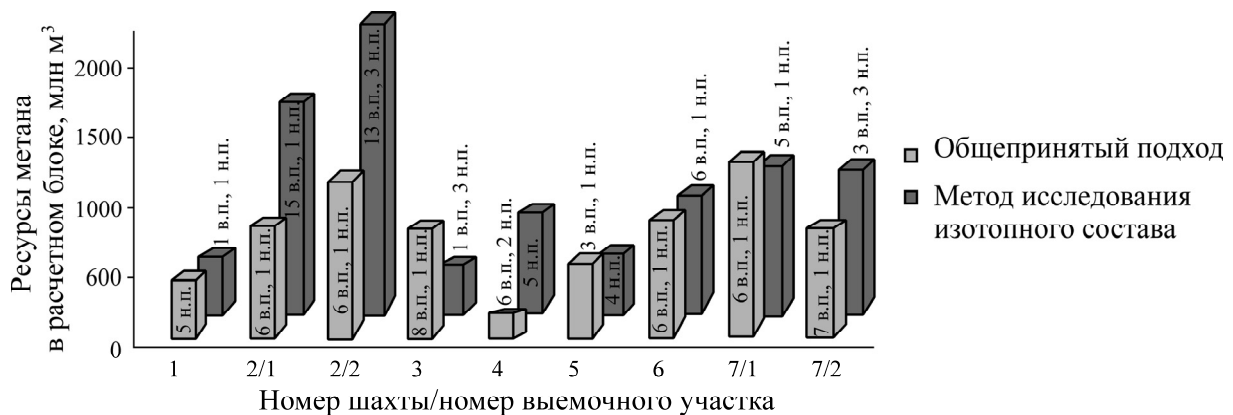


Рис. 6. Ресурсы метана в границах расчетных блоков шахт, определенные общепринятым подходом и методом исследования изотопного состава; в. п. — вышележащие, н. п. — нижележащие пласты

## ВЫВОДЫ

В ходе пополнения базы данных изотопного состава углерода метана в условиях шахт Кузбасса скорректирована зависимость смещения изотопного состава углерода метана  $\delta^{13}\text{C}$  от глубины залегания угольных пластов. На основе этой зависимости разработана математическая модель, позволившая установить влияние выше- и нижележащих угольных пластов на выемочный участок по газовому фактору. Определены геометрические размеры зоны влияния на очистной забой шахтного метана выше- и нижележащих угольных пластов по фактическим измерениям изотопного состава углерода метана рудничной атмосферы и метана, находящегося в рабочем угольном пласте. Выполнены расчеты максимального значения объема метана, который может оказать влияние на очистной забой в процессе отработки выемочного участка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширяев С. Н., Тайлаков О. В., Застрелов Д. Н., Герасимов А. В. Исследование остаточной газоносности угольных пластов Ерунаковского месторождения Кузбасса // Вестн. КузГТУ. — 2020. — № 2 (138). — С. 5–11.
2. Локшина Л. Я., Вавилин В. А., Литти Ю. В. Оценка продукции метана в образцах торфа из типичных болот Западной Сибири с помощью моделирования динамики стабильных изотопов углерода в метане и углекислом газе // Материалы VII Национальной научной конференции с международным участием “Математическое моделирование в экологии” (ЭкоМатМод). — 2021. — С. 70–72.
3. М. В. Курленя, К. Х. Ли, В. Г. Казанцев, Ли Хи Ун. Физико-математическая модель фильтрации метана в нестационарном поле напряжений угольного пласта // ФТПРПИ. — 2024. — № 3. — С. 3–13.
4. Li Y., Wu S., Nie B., and Ma Y. A new pattern of underground space-time Tridimensional gas drainage: A case study in Yuwu coal mine, China, Energy Sci. and Eng., 2019, Vol. 7, No. 4. — P. 399–410.
5. Тайлаков О. В., Уткаев Е. А., Макеев М. П. Определение фильтрационных свойств угольных пластов по результатам шахтных измерений // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2020. — № 6. — С. 366–370.
6. Тайлаков О. В., Застрелов Д. Н., Макеев М. П., Уткаев Е. А., Салтымаков Е. А. Изучение фильтрационных свойств углей Кузбасса // Сб. тезисов докл. XI Междунар. Российско-Казахстанского симпозиума “Углекислотная и экология Кузбасса”. — Кемерово, 2022. — С. 86.
7. Hou X., Liu S., Zhu Y., and Yang Y. Evaluation of gas contents for a multi-seam deep coalbed methane reservoir and their geological controls: In situ direct method versus indirect method, China, Fuel, 2020, Vol. 265. — 116917.
8. Соболева Е. В., Большакова М. А., Корнева Т. Н., Натитник И. М., Мальцев В. В., Санникова И. А., Сауткин Р. С. Влияние геолого-геохимических условий формирования залежей на состав и свойства углеводородных флюидов (на примере Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения) // Георесурсы. — 2019. — Т. 21. — № 2. — С. 190–202.
9. Schaeffer P., Bailly L., Motsch E., and Adam P. Organic Geochemistry, 2019, Vol. 136. — 103889.
10. Polyakov V. B. and Horita J. Chemical Geology, 2021, Vol. 559. — 119948.
11. Краснова Е. А., Юрченко А. Ю., Калмыков А. Г., Фомина М. М. Изотопно-геохимические особенности распределения газообразных углеводородов в разрезе баженовской свиты (южная часть Западной Сибири) // Георесурсы. — 2019. — Т. 21. — № 2. — С. 153–158.
12. Зубков М. Ю. Роль тектоно-гидротермальных процессов в формировании залежей газа на севере Западной Сибири // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2022. — № 4 (52). — С. 28–45.

13. Сафина Н. П., Масленников В. В., Артемьев Д. А., Садыков С. А., Архиреева Н. С. Сопоставление пиритовых конкреций углеродистых алевралитов Сафьяновского-Колчеданного месторождения (Средний Урал) по результатам ЛА-ИСП-МС и изотопного анализа // Металлогения древних и современных океанов. — 2019. — № 1. — С. 132–135.
14. Журавлева А. В. Термальная деградация изотопного состава углерода органического вещества конodontов: предварительные результаты // Вестн. геонаук. — 2020. — № 2(302). — С. 29–31.
15. Тюрин А. М. Изотопный состав углерода метана Оренбургского НГКМ в контексте развития модели его формирования // Недра Поволжья и Прикаспия. — 2022. — № 107. — С. 18–26.
16. Hartke E. R., Bradley D., Cramer B. D., Calner M., Melchin M. J., Barnett B. A., Oborny S. C., and Bancroft A. M. Decoupling  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  at the onset of the Ireviken Carbon Isotope Excursion:  $\Delta^{13}\text{C}$  and organic carbon burial (forg) during a Silurian oceanic anoxic event, USA, Global and Planetary Change, 2021, Vol. 196. — 103373.
17. Половинкина О. Н., Михайленко В. С., Кириллова Н. В. Основные методы измерений в газовом анализе // Вестн. МАНЭБ. — 2023. — Т. 28. — № 4. — С. 24–29.
18. Макась А. Л., Кудрявцев А. С., Трошков М. Л. Новый подход к измерению комбинированного изотопного состава метана с целью его генетической характеристики // Геофизические технологии. — 2022. — № 4. — С. 41–53.
19. Скузоватов С. Ю., Белозерова О. Ю., Васильева И. Е., Зарубина О. В., Канева Е. В., Сокольникова Ю. В., Чубаров В. М., Шабанова Е. В. Современное состояние методов изучения вещества на микро- и макроуровне // Центр коллективного пользования “изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН: Геодинамика и тектонофизика. — 2022. — Т. 13. — № 2.

*Поступила в редакцию 16/VIII 2024*

*После доработки 16/IX 2024*

*Принята к публикации 24/IX 2024*