

DOI: 10.26730/1999-4125-2017-5-73-78

УДК 550.423

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ В АТМОСФЕРУ  
ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗОТОПНОГО  
СОСТАВА УГЛЕРОДА МЕТАНА**

**DEFINING OF THE SOURCES OF GAS EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE  
OF LONGWALL ON THE BASIS OF THE MEASUREMENTS OF THE ISOTOPIC  
COMPOSITION OF THE METHANE CARBON**

**Тайлаков Олег Владимирович<sup>1,2</sup>,**

доктор техн. наук, профессор, e-mail: tailakov@uglemetan.ru

**Tailakov Oleg V.<sup>1,2</sup>, Dr. Sc., Professor**

**Макеев Максим Павлович<sup>1</sup>,**

кандидат техн. наук, старший научный сотрудник

**Makeev Maksim P.<sup>1</sup>, C.Sc. (Engineering), Senior researcher**

**Герасимов Артем Вячеславович<sup>1</sup>,**

аспирант

**Gerasimov Artem V.<sup>1</sup>, postgraduate**

**Коровин Денис Сергеевич<sup>1</sup>,**

инженер

**Korovin Denis S.<sup>1</sup>, engineer**

<sup>1</sup>Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, Россия, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10

<sup>1</sup>Coal Institute of FRC CCC SB RAS, 10, Leningradsky Ave., Kemerovo, 650065, Russian Federation

<sup>2</sup>Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

<sup>2</sup>T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Аннотация\*.** Для уточнения газового баланса выемочного участка предложено идентифицировать источники поступления метана в горные выработки угольных шахт на основе измерений содержания изотопов углерода в этом газе. Для определения закономерности изменения соотношения содержания легких изотопов углерода метана с глубиной залегания угольных пластов в Кузбассе отобраны и исследованы пробы метана, содержащегося в угле и шахтной атмосфере. Установленная зависимость использована при численном моделировании газораспределения очистного забоя. Для двух угольных шахт выполнены расчеты количества нижележащих и вышележащих пластов-спутников, оказывающих влияние на формирование газового баланса выемочного участка. Предложенный подход позволяет определять пласты-спутники, оказывающие влияние на формирование газового баланса выемочного участка и может быть использован для разработки и совершенствования мероприятий по дегазации угольных пластов, проветриванию горных выработок и повышению безопасности ведения горных работ.

**Abstract.** To clarify the gas balance of the extraction panel it was proposed to identify the sources of methane migration into the mine workings of underground coal mines based on measurements of the carbon isotope content in this gas. To determine the regularity of the change in the ratio of the content of light isotopes of methane carbon with the depth of occurrence of coal seams in Kuzbass, samples of methane contained in coal and mine atmosphere were taken and tested. The established dependence is used for numerical simulation of the gas distribution in the working face. For two coal mines evaluation of the number of underlying and overlying seams have been performed, which have an effect on the formation of the gas balance of the extraction panel. The proposed approach makes it possible to determine the satellite coal seams that affect the formation of the gas balance of the extraction panel and can be used to design and improve the measures for degassing coal seams, air supply in to the mine workings and improving the safety of mining operations.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-45-420916 p\_a.

**Ключевые слова:** газовый баланс, шахтный метан, изотопный анализ, угольные пласты, изотопы углерода метана, выемочный участок

**Keywords:** gas balance, mine methane, isotopic analysis, coal seams, methane carbon isotopes, extraction panel

Основными источниками метановыделения в атмосферу выемочного участка являются разрабатываемый пласт и пласты-спутники. Представления о процессах поступления метана в горные выработки развиты в достаточной степени и отражены в нормативных документах, определяющих порядок, параметры и схемы проветривания угольных шахт и дегазации угольных пластов, и в общем виде сводятся к следующему. Перед забоем при отбойке угля формируется зона опорного горного давления. В этой области интенсивно развиваются трещины, по которым в очистной забой поступает метан из разрабатываемого пласта. Область опорного давления также оказывает влияние на пласты-спутники. В процессе посадки кровли метан по трещинам поступает в зону разгрузки от горного давления и затем в выработку выемочного участка [1-6]. В инженерных расчетах метанобильности выемочного участка учитываются надрабатываемые пласты, залегающие на удалении до 35 м, и подрабатываемые пласты - до 300 м по нормали от разрабатываемого пласта. Вместе с тем, очевидно, что газоносность пластов-спутников может существенным образом меняться в зависимости от свойств угля, глубины их залегания, расстояния до разрабатываемого пласта (межпластья), что может оказывать существенное влияние на формирование газового баланса. В связи с этим поставлена задача оценивания источников и объемов метановыделения в горные вы-

работки выемочного участка на основе измерения изотопного состава углерода шахтного метана.

Определение генезиса шахтного метана основано на исследовании содержания в этом газе двух углеродов с атомным номером 6 и массовым числом 12 и 13 (стабильные изотопы углерода) с учетом изотопной распространенности в природе углерода-12 - 98,93 % и углерода-13 - 1,07 %. Известно, что изотопный состав углерода метана угольных пластов, залегающих на разных глубинах, различается. При этом с увеличением глубины в соотношении содержания стабильных изотопов углерода метана  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$  в угле возрастает доля  $^{13}\text{C}$ , что свидетельствует о его более раннем образовании [7-15].

Для определения закономерности изменения соотношения содержания легких изотопов углерода метана в Кузбассе с глубиной залегания угольных пластов на четырех шахтах отобрано 36 проб метана, содержащегося в угле (на глубинах 270-460 м) и шахтной атмосфере. С помощью изотопного газоанализатора DLT-100 (MCIA) были получены смещения изотопного состава углерода метана  $\delta^{13}\text{C}$  для каждой из проб. Изменения усредненных значений смещения изотопного состава углерода метана  $\delta^{13}\text{C}$  в зависимости от глубины залегания угольных пластов аппроксимированы экспоненциальной функцией с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,86$  (рис. 1).

Соотношение содержания изотопов углерода в

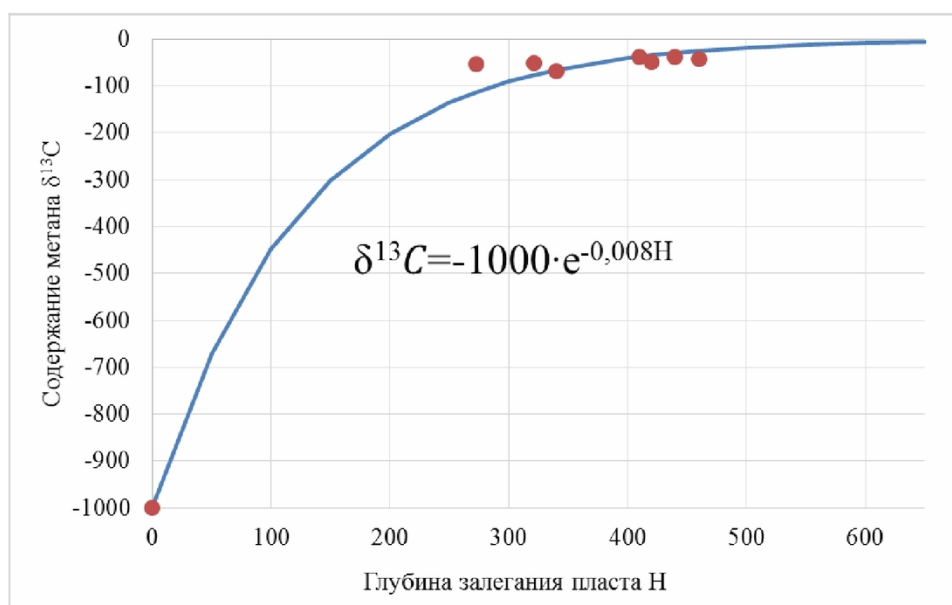


Рис. 1. Зависимость смещения изотопного состава углерода шахтного метана  $\delta^{13}\text{C}$  от глубины залегания угольных пластов H в условиях Кузбасса

Figure 1. Dependence of the displacement of the carbon isotope composition of coal mine methane  $\delta^{13}\text{C}$  on the depth of occurrence of coal seams H in the conditions of Kuzbass

шахтной атмосфере выемочного участка может быть представлено в следующем виде (рис. 2)

$$\frac{{}^{12}\text{C}}{{}^{13}\text{C}} = \frac{{}^{12}\text{C}_p V_p + \sum_{i=1}^N {}^{12}\text{C}_{ниi} V_{ниi} + \sum_{j=1}^K {}^{12}\text{C}_{внj} V_{внj}}{{}^{13}\text{C}_p V_p + \sum_{i=1}^N {}^{13}\text{C}_{ниi} V_{ниi} + \sum_{j=1}^K {}^{13}\text{C}_{внj} V_{внj}} \quad (1)$$

где  $C_p$ ,  $C_{ни}$ ,  $C_{вн}$  – углерод шахтного метана, выделившийся из разрабатываемого пласта, нижних и верхних пластов-спутников;

$V_p$ ,  $V_{ни}$ ,  $V_{вн}$  – объем выделившегося метана из рабочей зоны, нижних и верхних пластов-спутников;

$i=1, \dots, N$ ,  $j=1, \dots, K$  – количество нижележащих и вышележащих пластов-спутников, вовлеченных в формирование газового баланса очистного участка;

«12», «13» – индексы, соответствующие углероду-12 и углероду-13.

Допустим, что время полного выделения ме-

тана для всех пластов одинаково, тогда объем газа равен произведению массы угля  $M_{\text{угля}}$  на его газо-носность  $\chi$

$$V_{\text{газа}} = M_{\text{угля}} \cdot \chi. \quad (2)$$

Массу отбитого угля в рабочей зоне определим как произведение площади груди забоя на глубину захвата  $r$  очистного комбайна. Тогда объем метана в рабочей зоне

$$V_p = (r \cdot m_p \cdot L_{\text{лавы}}) \cdot P \cdot \chi, \quad (3)$$

где  $m_p$  – мощность рабочего пласта;  $L_{\text{лавы}}$  – длина лавы;  $P$  – плотность угля.

Массу угля в пластах-спутниках найдем как произведение площади зоны опорного давления на мощность пласта

$$M_{ниi} = l \cdot m_{ниi} \cdot L_{\text{лавы}} \\ M_{внj} = l \cdot m_{внj} \cdot L_{\text{лавы}}, \quad (4)$$

где  $l$  – длина зоны опорного давления;  $m_{ни}$  и  $m_{вн}$  – мощности соответствующих пластов-спутников.

Смещение изотопного состава  $\delta^{13}\text{C}$  в атмо-

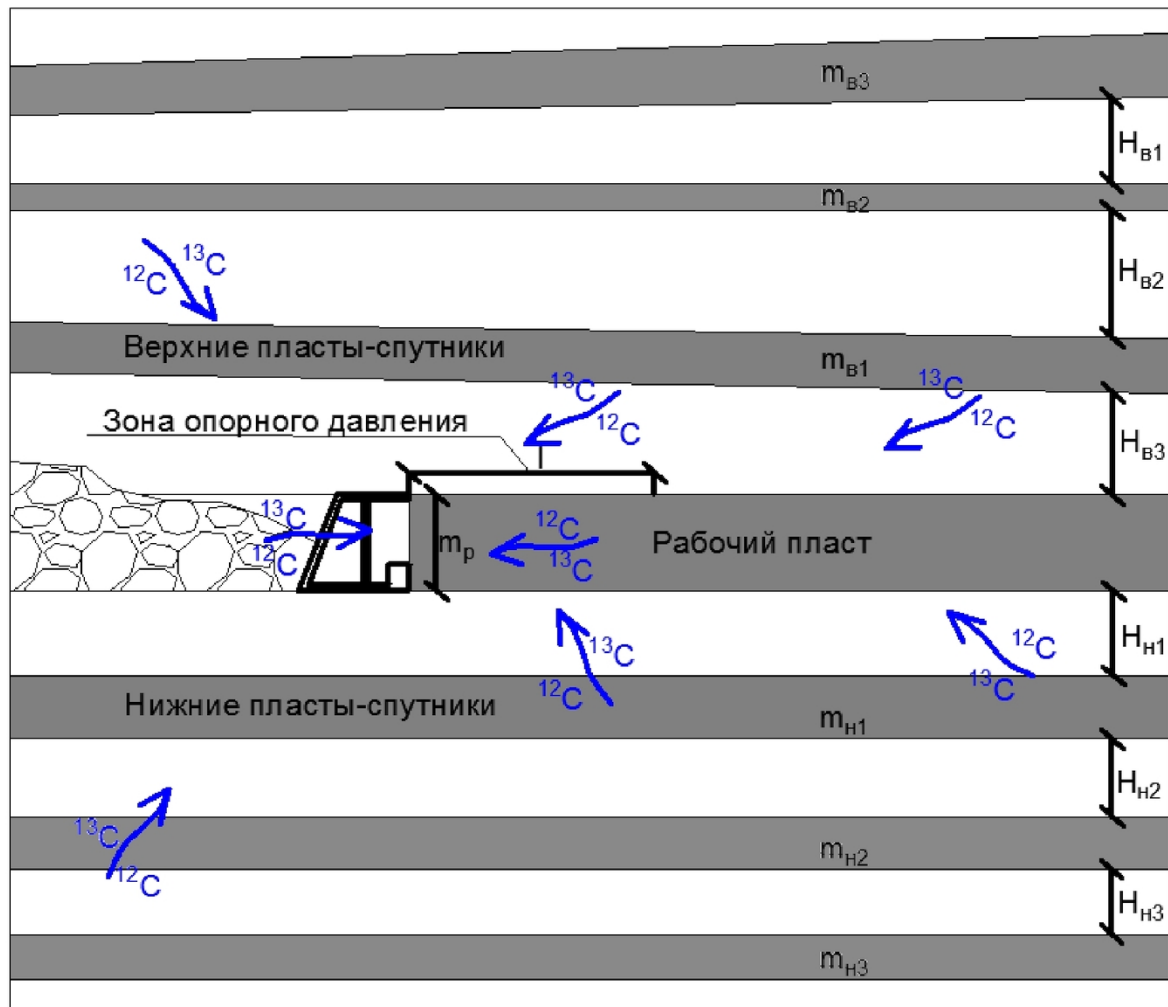


Рис. 2. Схематичное представление поступления углерода шахтного метана в рабочую зону очистного забоя

Figure 2. Schematic presentation of mine methane carbon input into the working zone of the coal face

Таблица 1 Условия залегания угольных пластов  
Table 1. Conditions of coal seams occurrence

Параметр	Выемочный участок А	Выемочный участок В
Глубина залегания рабочего пласта $H$ , м	420	340
Мощность рабочего пласта $m_p$ , м	2,5	2
Глубина захвата очистного комбайна $r$ , м	0,8	0,63
Длина лавы $L_{лавы}$ , м	300	250
Мощность вышележащих пластов-спутников $m_{вп}$ , м	0,2	0,15
Мощность нижележащих пластов-спутников $m_{нп}$ , м	0,1	0,3
Длина зоны опорного давления $l$ , м	60	60
Плотность угля $P$ , т/м <sup>3</sup>	1,35	1,35
Газоносность $\chi$ , м <sup>3</sup> /т	13	13
Разность глубин залегания до и между верхними пластами-спутниками $H_{вп}$ , м	30	10
Количество вышележащих пластов-спутников $N_{вп}$	5	8
Разность глубин залегания до и между нижними пластами-спутниками $H_{нп}$ , м	20	40
Количество нижележащих пластов-спутников $N_{нп}$	3	2
Смещение изотопного состава углерода метана $\delta^{13}C$ в шахтной атмосфере, ppm	-53,78	-76,38
Изотопы углерода метана в отбитом угле $C_p^{12}$	23,23	20,80
Изотопы углерода метана в отбитом угле $C_p^{13}$	0,25	0,22

Таблица 2 Результаты расчетов содержания изотопов углерода метана  $^{12}C$  для пластов-спутников  
Table 2. Results of calculations of the isotope content of methane carbon  $^{12}C$  for satellite seams

Нижележащие пласты-спутники				
Выемочный участок	Номер пласта, $i$	Глубина залегания, $H_i$	$\delta^{13}C$	$^{12}C_{ни}$
А	1	440	-29,60	22,93
	2	460	-25,22	22,82
	3	480	-21,49	22,74
В	1	380	-47,83	20,55
	2	420	-34,74	20,27
Вышележащие пласты-спутники				
Выемочный участок	Номер пласта, $j$	Глубина залегания, $H_j$	$\delta^{13}C$	$^{12}C_{вп}$
А	1	390	-44,16	23,28
	2	360	-56,13	23,57
	3	330	-71,36	23,96
	4	300	-90,72	24,47
	5	270	-115,33	25,15
В	1	330	-71,36	21,07
	2	320	-77,30	21,22
	3	310	-83,74	21,36
	4	300	-90,72	21,52
	5	290	-98,27	21,70
	6	280	-106,46	21,90
	7	270	-115,33	22,12
	8	260	-124,93	22,36

сфере очистного забоя, а также содержание изотопов углерода метана  $^{12}C_p$  и  $^{13}C_p$  в отбитом угле определялись с помощью изотопного газоанализатора.

В предположении, что содержание  $^{13}C$  не изменяется для рабочего пласта и пластов-спутников (т.е.  $^{13}C_{ни} = ^{13}C_{вп} = ^{13}C_p$ ), значения  $^{12}C_{ни}$  и  $^{12}C_{вп}$  можно определить из формулы смещения изотопного состава углерода при заданной глу-

бине залегания пласта относительно международного стандарта PDB

$$\delta^{12}C = \frac{\delta^{13}C}{\left(\frac{\delta^{13}C}{1000} + 1\right) \cdot 0,0112372} \quad (5)$$

где

$$\delta^{13}C = -1000 \cdot e^{-0,008H} \quad (6)$$

С использованием формул (1-6) газовый баланс выемочного участка можно представить в виде оптимизационной модели

$$\left[ \begin{array}{c} \left( \frac{^{12}C_p V_p + \sum_{i=1}^N ^{12}C_{nni} V_{nni} + \sum_{j=1}^K ^{12}C_{enj} V_{enj}}{^{13}C_p V_p + \sum_{i=1}^N ^{13}C_{nni} V_{nni} + \sum_{j=1}^K ^{13}C_{enj} V_{enj}} \times \right. \\ \left. \times 0,0112372 \right)^{-1} \times \\ -1 \\ \times 1000 \rightarrow \delta^{13}C_{оч.з.} \end{array} \right] \times \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq N \leq N_{nn} \\ 0 \leq K \leq N_{en} \end{cases} \quad (8)$$

где  $N_{nn}$  и  $N_{en}$  – общее количество вышележащих и нижележащих пластов-спутников.

При этом определение  $C_{nn}$  и  $C_{en}$  сводится к вычислению коэффициентов  $N$  и  $K$  с учетом нели-

нейного изменения  $^{12}C_{nn}$  и  $^{12}C_{en}$  путём перебора значений.

Рассмотрим два выемочных участка с условиями залегания угольных пластов, представленных в табл.1.

Объемы выделившегося метана  $V_p$ ,  $V_{nn}$  и  $V_{en}$ , рассчитанные по формулам (2-3), равны 10530, 31590, 63180 м<sup>3</sup> и 5528, 78975, 39488 м<sup>3</sup> для выемочного участка А и В, соответственно. Концентрация изотопа углерода метана  $^{12}C$  для пластов-спутников представлена в табл. 2.

На выемочном участке А наименьшее расхождение между измеренным и расчетным смещениями изотопного состава метана, поступившего в очистной забой, составляет 1,5 % при учете одного нижнего и трех верхних пластов-спутников. На выемочном участке В наименьшее расхождение в 0,4 % достигается при учете только трех верхних пластов-спутников.

Таким образом, предложенный подход позволяет уточнить расстояние от разрабатываемого пласта до пластов-спутников, которые оказывают влияние на формирование газового баланса выемочного участка, а также их количество. Эти данные могут быть использованы в дальнейшем для проведения мероприятий по повышению эффективности дегазации угольных пластов и выработанного пространства, например, путем бурения более плотной сетки дегазационных скважин в область повышенного метановыделения углепородного массива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тайлаков О.В., Тайлаков В.О., Застрелов Д.Н., Кормин А.Н. Способ оценки ресурсов метана угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № S415. С. 3-10.
2. Тайлаков О.В., Кормин А.Н., Тайлаков В.О. Определение остаточной газоносности угольных пластов на основе макрокинетических десорбционных процессов фильтрации и диффузии метана для оценки эффективности дегазации // Наука и техника в газовой промышленности. 2014. № 1 (57). С. 10-13.
3. Тайлаков О.В., Мазаник Е.В., Кормин А.Н. Разработка методики определения газоносности угольных пластов в процессе ведения горных работ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2011. № S8. С. 210-214.
4. Tailakov, O.V. Physical modeling of fluid flow in the near-wellbore formation zone on the basis of equivalent materials / O.V. Tailakov, E.A. Utkaev, D.N. Zastrelov, S.V. Sokolov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol 770 – pp 349-353.
5. Тайлаков, О.В. Определение газоносности угольных пластов на основе исследования процессов фильтрации и диффузии метана / О.В. Тайлаков, А.Н. Кормин, Д.Н. Застрелов, Е.А. Уткаев // УГОЛЬ. – 2015. – №1 – С. 74-77.
6. Уткаев, Е.А. О влиянии нарушения призабойной зоны скважины на фильтрационные характеристики угольного пласта / Уткаев Е.А. // Метан: Сборник научных трудов по материалам симпозиума «Неделя горняка-2009». Отдельный выпуск Горного Информационно-аналитического бюллетеня. – 2009. – № ОВ11. – С. 301–305.
7. Ермаков В. И., Лебедев В. С., Немченко Н. Н., Ровенская А. С., Грачев А. В. Изотопный состав углерода природных газов севера Западно-Сибирской низменности в связи с вопросом их генезиса//ДАН СССР.- 1970.-том 190.- № 3.- стр. 683—686.
8. Гусев М. В., Минеева Л. А. Микробиология. — М: Изд-во Московского университета, 2004. - 448 с.



9. Hamilton, S. K., Golding, S. D., Baublys, K. A. Stable isotopic and molecular composition of desorbed coal seam gases from the Walloon Subgroup, eastern Surat Basin, Australia // *International journal of coal geology*. – 2014. – V 122. – P. 21-36.
10. Li Y., Tang Da Z., Fang Y. и др. Distribution of stable carbon isotope in coalbed methane from the east margin of Ordos Basin // *Science China-Earth Sciences*. – 2014. – V 57. – R. 8. – P. 1741-1748.
11. Audi G., Bersillon O., Blachot J. and Wapstra A. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties // *Nuclear Physics*. – 2003. – A 729. – P. 3–128.
12. Тайлаков О.В., Герасимов А.В., Ефимов В.И., Тайлаков В.О. Изотопный состав углерода шахтного метана. – *Горный журнал*. 2016. № 5. С. 106-108.
13. Thomas Thielemann, Bernhard Cramer, Axel Schippers Coalbed methane in the Ruhr Basin, Germany: a renewable energy resource? // *Organic Geochemistry* 35 (2004) 1537–1549.
14. Golding, S. D., Boreham C. J., Hamilton, S. K. Composition and Origin of Coal Seam Gases in the Bowen and Surat Basins, Queensland // *Asia Pacific Coalbed Methane Symposium*. – 2011.
15. Golding, S. D., Boreham, C. J. & Esterle, J. S. Stable isotope geochemistry of coal bed and shale gas and related production waters // *Int. J. Coal* –2013 – 120. – P. 24–40.

## REFERENCES

1. Taylakov O.V., Taylakov V.O., Zastrelov D.N., Kormin A.N. Cпособ otsenki re-surov metana ugol'nykh plastov // *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2014. № S415. pp. 3-10.
2. Taylakov O.V., Kormin A.N., Taylakov V.O. Opredeleniye ostatochnoy gazonosnosti ugol'nykh plastov na osnove makrokineticheskikh desorbtsionnykh protsessov fil'tratsii i diffuzii metana dlya otsenki effektivnosti degazatsii // *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti*. 2014. № 1 (57). pp. 10-13.
3. Taylakov O.V., Mazanik Ye.V., Kormin A.N. Razrabotka metodiki opredeleniya gazonosnosti ugol'nykh plastov v protsesse vedeniya gornykh rabot // *Gornyy informa-tsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)*. 2011. № S8. pp. 210-214.
4. Tailakov, O.V. Physical modeling of fluid flow in the near-wellbore formation zone on the basis of equivalent materials / O.V. Tailakov, E.A. Utkayev, D.N. Zastrelov, S.V. Sokolov // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol 770 – pp. 349-353.
5. Taylakov, O.V. Opredeleniye gazonosnosti ugol'nykh plastov na osnove issledovaniya protsessov fil'tratsii i diffuzii metana / O.V. Taylakov, A.N. Kormin, D.N. Zastrelov, Ye.A. Utkayev // *UGOL'*. – 2015. – №1 – pp. 74-77.
6. Utkayev, Ye.A. O vliyani narusheniya prizaboynoy zony skvazhiny na fil'tracionnyye kharakteristiki ugol'nogo plasta / Utkayev Ye.A. // *Metan: Sbornik nauchnykh trudov po materialam simpoziuma «Nedelya gornyaka-2009»*. Otdel'nyy vypusk Gornogo Informatsionno-analiticheskogo byulletenya. – 2009. – № OV11. – pp. 301–305.
7. Yermakov V. I., Lebedev V. S., Nemchenko N. N., Rovenskaya A. S., Grachev A. V. Izotopnyy sostav ugleroda prirodnykh gazov severa Zapadno-Sibirskoy nizmennosti v svyazi s voprosom ikh genezisa//*DAN SSSR*.- 1970.-tom 190.- № 3.- pp. 683—686.
8. Gusev M. V., Mineyeva L. A. *Mikrobiologiya*. — M: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 2004. — p. 448.
9. Hamilton, S. K., Golding, S. D., Baublys, K. A. Stable isotopic and molecular composition of desorbed coal seam gases from the Walloon Subgroup, eastern Surat Basin, Australia // *International journal of coal geology*. – 2014. – V 122. – pp. 21-36.
10. Li Y., Tang Da Z., Fang Y. и др. Distribution of stable carbon isotope in coalbed methane from the east margin of Ordos Basin // *Science China-Earth Sciences*. – 2014. – V 57. – R. 8. – pp. 1741-1748.
11. Audi G., Bersillon O., Blachot J. and Wapstra A. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties // *Nuclear Physics*. – 2003. – A 729. – pp. 3–128.
12. Taylakov O.V., Gerasimov A.V., Yefimov V.I., Taylakov V.O. Izotopnyy sostav ugleroda shakhtnogo metana. – *Gornyy zhurnal*. 2016. № 5. pp. 106-108.
13. Thomas Thielemann, Bernhard Cramer, Axel Schippers Coalbed methane in the Ruhr Basin, Germany: a renewable energy resource? // *Organic Geochemistry* 35 (2004) 1537–1549.
14. Golding, S. D., Boreham C. J., Hamilton, S. K. Composition and Origin of Coal Seam Gases in the Bowen and Surat Basins, Queensland // *Asia Pacific Coalbed Methane Symposium*. – 2011.
15. Golding, S. D., Boreham, C. J. & Esterle, J. S. Stable isotope geochemistry of coal bed and shale gas and related production waters // *Int. J. Coal* –2013 – 120. – pp. 24–40.

Поступило в редакцию 12.10.2017

Received 12.10.2017