

**КАЛИБРОВОЧНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ СВЯЗИ МЕЖДУ УРАВНЕНИЕМ
АДСОРБЦИИ ЛЕНГМЮРА И КИНЕМАТИЧЕСКИМ ВЫРАЖЕНИЕМ
В. Н. ОПАРИНА ДЛЯ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА ПО ДАННЫМ
НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КУЗБАССА**

Виктор Николаевич Опарин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, Новосибирск, Красный проспект, 54, д.ф-м.н., член-корр. РАН, зав. отделом экспериментальной геомеханики, тел. 2053030 доп.113, e-mail: oparin@misd.ru

Татьяна Анатольевна Киряева

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, кандидат технических наук, тел: 89231703211, e-mail: coalmetan@mail.ru

В статье показано, что в настоящее время существуют экспериментально-теоретические предпосылки для установления формализованных связей между деформационно-волновыми и физико-химическими процессами, протекающими в реальных многофазных массивах горных пород. Установлены калибровочные коэффициенты связи в операторе соответствия между уравнением адсорбции и кинематическим выражением для маятниковых волн, верифицированные в сравнении с имеющимися измерениями в лабораторных и натуральных экспериментах для углей всего метаморфического ряда: определены количественные значения физико-химического инварианта для углей различных стадий метаморфизма и структурного параметра геосреды, а также скорости распространения продольной волны в геоблоках-носителях маятниковых волн и трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков для разных стадий метаморфизма. Показано, что значения полученной дисперсии позволяют учесть все многообразие основных стадий метаморфизма угольных месторождений Кузбасса в теории и прогнозе выбросоопасности, т.е. учитывать реальные качества угольных пластов.

Ключевые слова: углеметановые пласты, нелинейные геомеханические и физико-химические процессы, волны маятникового типа, продольные волны, калибровочные коэффициенты связи в операторе соответствия, уравнение Ленгмюра, кинематическое выражение В. Н. Опарина

**CALIBRATION COEFFICIENTS OF CONNECTION BETWEEN
THE LANGMUIR ADSORPTION EQUATION AND V.N. OPARINA'S
KINEMATIC EXPRESSION FOR PENDULUM-TYPE WAVES ACCORDING
TO LOCAL MEASUREMENTS AT THE COAL DEPOSITS OF KUZBASS**

Viktor N. Oparin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Doctor of Physics and Mathematics, Corresponding Member RAS, head. Department of Experimental Geomechanics, 54 Krasny Pr., Novosibirsk, 630091, Russia. Tel: (383) 217-05-36; e-mail: oparin@misd.ru

Tatiana A. Kiryaeva

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny prospect, Ph. D., tel. (923)170-32-11, e-mail: coalmetan@mail.ru

The article shows that at present there are experimental and theoretical prerequisites for establishing formalized relationships between deformation-wave and physicochemical processes occurring in real multiphase rock massifs. The calibration coefficients of the relationship in the correspondence operator between the adsorption equation and the kinematic expression for pendulum waves were established, verified in comparison with the available measurements in laboratory and field experiments for coals of the entire metamorphic series: quantitative values of the physicochemical invariant were determined for coals of different stages of metamorphism and structural parameter of the geomedium, as well as the velocity of propagation of a longitudinal wave in geoblocks-carriers of pendulum waves and translational movement of "colliding" geoblocks for different stages of metamorphism. It is shown that the values of the obtained dispersion allow one to take into account all the variety of the main stages of metamorphism of Kuzbass coal deposits in the theory and forecast of outburst hazard, i.e. take into account the real qualities of coal seams.

Keywords: coal seams, nonlinear geomechanical and physicochemical processes, pendulum waves, longitudinal waves, calibration coupling coefficients in the correspondence operator, Langmuir's and V.N. Oparin's equations

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00051.

Введение

Проведенный комплекс экспериментальных исследований по анализу связей между тепловыми и деформационно-волновыми процессами, возникающими в угольных образцах разного марочного состава (месторождения Кузбасса) при одноосном жестком нагружении до разрушения, а также исследование эволюции полей микродеформаций, проведенное спекл-методом на угольных образцах при одноосном сжатии позволили в [1] дать положительный ответ на вопрос ключевой значимости: существуют ли в настоящее время экспериментально-теоретические предпосылки для установления формализованных связей между деформационно-волновыми и физико-химическими процессами, протекающими в реальных многофазных органогенно-насыщенных массивах горных пород, при нарушении их исходного напряженно-деформированного состояния (источниками различного типа), а также при наличии господствующего на заданных глубинах поля температур.

Научные основы применяемой в настоящей работе методологии и метода определения динамико-кинематических характеристик нелинейных упругих волн маятникового типа достаточно подробно изложены в [1], в основном, на примере рудных и нефтегазовых месторождений полезных ископаемых. Здесь отразим лишь ключевые моменты, необходимые для понимания приводимого ниже экспериментального материала, но относящегося уже к угольным месторождениям, когда источником возникновения маятниковых волн становятся очаги природно-техногенных землетрясений (в т.ч. и горно-тектонические удары

или мощные технологические взрывы), а их «последствием» - газодинамические события на угольных шахтах, «модулируемые» нелинейными деформационно-волновыми процессами, сопряженными с распространением пакетов маятниковых волн.

Во-первых, это использование подробно описанных в [1] физико-механических представлений и феноменологических связей.

Во-вторых, это – энергетическое условие возникновения и распространения волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения:

$$\hbar = \frac{W}{M \mathcal{G}_\rho^2} = \theta \cdot 10^{-9}, \theta \in 1 \div 4, M = \rho \cdot V, \quad (1)$$

$$W = \alpha(V) \cdot [U_0 + W_k] \quad (2)$$

где U_0 – потенциальная (упругая), W_k – кинетическая энергии структурных элементов горных пород в очаговой зоне разрушения объемом V ; $\alpha(V)$ – коэффициент сейсмического действия подземных взрывов по Садовскому М.А.; ρ – плотность горных пород; \mathcal{G}_ρ^2 – аналитическое выражение для упругих волн продольного типа, известным образом зависящее от модуля Юнга, коэффициента Пуассона и плотности пород ρ .

Как показано в [2], соотношения (1) и (2) оказываются справедливыми практически в любых нелинейных динамических процессах, связанных с движениями структурных элементов в массивах горных пород в режиме «физических маятников» и, в первую очередь, в очаговых зонах землетрясений, горных ударов, взрывов, при бурении скважин, а также возникновении геомеханических квазирезонансных состояний.

Кинематическое выражение для волн маятникового типа дано в [1]:

$$\mathcal{G}_v = \frac{(1 + \nu[\sigma]) \mathcal{G}_\varepsilon \mathcal{G}_p}{\mathcal{G}_\varepsilon + \nu[\sigma] \mathcal{G}_p}, \quad (3)$$

где \mathcal{G}_v – скорость распространения маятниковых волн; \mathcal{G}_p – скорость распространения продольных волн в геоблоках-носителях маятниковой волны; \mathcal{G}_ε – средняя скорость (по модулю) трансляционного движения соударяющихся геоблоков диаметром Δ ; $\nu[\sigma]$ – структурный параметр геосреды, зависящий от напряженного состояния σ и аппроксимируемый параболической зависимостью на допредельной стадии деформирования в виде:

$$\nu[\sigma] = \nu_0 \left[2 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 \right], \quad (4)$$

где σ_0 – предел прочности структурных элементов размера Δ ; v_0 – минимальное значение этого параметра при действующем в заданном объеме горных пород виде напряженно-деформированного состояния.

На внешней поверхности очаговой зоны таких динамических событий скоростная характеристика \mathcal{G}_ε в формуле (3) становится непосредственно зависящей от энергетической характеристики W . Так, в работе [3] показано, что при $\alpha(V) \cong 1,5 \cdot 10^{-2}$, $W_k = 0$ – условия «порядкового» преобладания уровня действия литостатического давления ($U_0 \gg W_k$), а также при $3 \cdot 10^3 \leq \mathcal{G}_\rho \leq 6 \cdot 10^3$ м/с значения \mathcal{G}_ε в (4) можно оценить диапазоном:

$$\mathcal{G}_\varepsilon \in 2,52 \div 10 \text{ м/с.} \quad (5)$$

В-третьих, это доказательство в [1] операторной $\Omega\{\dots\}$ связи кинематического выражения для маятниковых волн В.Н. Опарина (3) и уравнения Ленгмюра (изотермы адсорбции):

$$\Omega\{\dots\} \equiv \left\{ \begin{array}{l} A \rightarrow \mathcal{G}_v \\ p \rightarrow \mathcal{G}_\varepsilon \\ \kappa \rightarrow \frac{1}{v[\sigma]\mathcal{G}_p} \\ A_* \rightarrow \mathcal{G}_p(v[\sigma]+1) \end{array} \right\}. \quad (6)$$

$$X_{\text{сорб}} = a \frac{bp}{1+bp}. \quad (7)$$

В (7) $X_{\text{сорб}}$ – абсорбционный аналог «изотермы мономолекулярной абсорбции» (газов/жидкости); a – предельное значение $X_{\text{сорб}}$ (максимальная абсорбция при заполнении абсорбентом пор и трещин в заданном геомеханическом состоянии пород или геоматериала); b – параметр, характеризующий отношение скоростей абсорбции и удаления газов/жидкости из заданного объема пор и/или трещин (аналог соответствующего коэффициента в исходном идеализированном уравнении Ленгмюра для изотерм мономолекулярной адсорбции газов/жидкостей).

Формулы (6) и (7), с учетом изложенных в [1] закономерностей, свидетельствуют о существовании непосредственной связи между нелинейными деформационно-волновыми и массо-газообменными (в т.ч. и физико-химическими) процессами в многофазных напряженных геосредах блочно-иерархического строения, осуществляемой через механизм знакопеременного движения геоблоков-носителей пакетов маятниковых волн. Иными словами, имеет место «модуляция» массо-газообменных процессов в реальных массивах горных пород деформационно-волновыми процессами за счет «осциллирующего» движения их структурных элементов [2].

**Определение калибровочных коэффициентов связи
между уравнением адсорбции и кинематическом выражением
для маятниковых волн на основе натуральных данных
для продуктивных угольных пластов**

Для установления конкретной количественной связи между уравнением адсорбции и кинематическом выражении для маятниковых волн в (3) введем калибровочные коэффициенты α и β для оператора соответствия Ω (6):

$$a = \vartheta_\nu \cdot \alpha, b = 1/\nu[\sigma]\vartheta_\rho \cdot \beta. \quad (8)$$

Следовательно, из (8) имеем:

$$\alpha = \frac{a}{\vartheta_\nu}, \beta = b \cdot \nu[\sigma]\vartheta_\rho, \quad (9)$$

где a, b – обобщенные коэффициенты сорбции из (7).

Очевидно, что для количественного определения калибровочных коэффициентов α и β необходимо иметь данные о геомеханическом инварианте $\mu_\Delta(\delta)$ (или его аналоге для углеродных сеток каменных углей – физико-химическом инварианте μ_Δ^*) и соответственно параметре $\nu[\sigma]$, а также скоростях распространения P, S и μ -волн в углях различных стадий метаморфизма [1].

Определение количественных значений физико-химического инварианта μ_Δ^* для углей различных стадий метаморфизма, а также структурного параметра геосреды $\nu[\sigma]$

На основе изложенных выше экспериментальных исследований структурных особенностей углей [4], их пористости и с учетом $Lc=\Delta$ были оценены значения физико-химического инварианта μ_Δ^* для разных стадий метаморфизма (табл. 1). Для количественного определения физико-химического инварианта μ_Δ^* , с учетом [1] необходимо обратиться к схеме структуры каменных углей (рис. 1), исходя из которой можно определить μ_Δ^* и толщину углеродной сетки lc для разупорядоченной области:

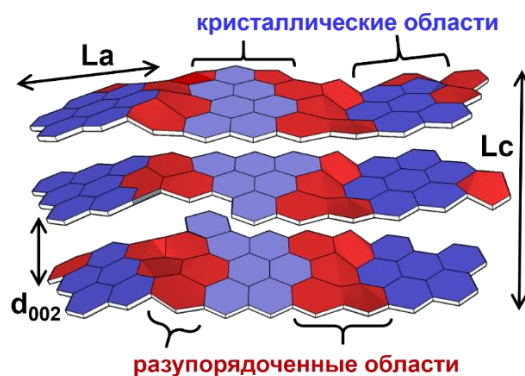


Рис. 1. Схема структуры каменных углей

$$l_c = \frac{L_c}{(N-1)} - d_{002}, \mu_{\Delta}^* = \frac{d_{002}}{l_c}. \quad (10)$$

Для кристаллической области углеродной сетки ее толщину можно считать равной диаметру атома углерода 0,154 нм [5]. Поскольку отделяющие структурные неоднородности (геоблоки) трещины или поры всегда частично заполнены газом, жидкостью или более мелким фрагментированным твердым веществом, для реальных массивов горных пород применяется упрощенная связь [1]:

$$v_{\Delta}(\delta) \sim 10^{-1} \mu_{\Delta}(\delta). \quad (11)$$

Структурный параметр геосреды $v[\sigma]$ можно определить из (11), с учетом полученных экспериментальных значений скоростей распространения P , S и μ -волн в углях различных стадий метаморфизма.

Таблица 1

Значения физико-химического инварианта μ_{Δ}^*
для разных стадий метаморфизма угля

V^{daf} , %	Расстояние между углеродными сетками, d_{002} , 10^{-10} м	Толщина углеродной сетки l_c , 10^{-10} м	μ_{Δ}^*	$v[\sigma]$
14,8	3,50	1,70	2,1	0,21
15,6	3,40	2,10	1,6	0,16
15,8	3,50	1,23	2,9	0,29
18,4	3,50	0,63	5,6	0,56
18,6	3,50	0,50	7,0	0,70
20	3,50	0,53	6,7	0,67
21	3,50	0,58	6,1	0,61
21,9	3,50	0,87	4,0	0,40
22,4	3,50	1,20	2,9	0,29
30,3	3,50	2,00	1,8	0,18
32,6	3,50	1,55	2,3	0,23
35,1	3,60	5,20	0,7	0,04
37	3,60	1,47	2,5	0,25
39,7	3,6	4,50	0,8	0,08

Определение ϑ_{ε} – средней скорости (по модулю) трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков диаметром Δ

Н.Н. Пузыревым [7] предложена весьма простая (но достаточно универсальная) линейная зависимость скоростей распространения продольных волн от плотности горных пород вида:

$$\vartheta_p[\text{км/с}] = 6 \cdot \rho[\text{г/см}^3] - 11 \quad (12)$$

При обработке данных из каталога [6] на основе (12) по 735 пластопересечениям углей Кузбасса с различными физико-химическими свойствами ($0,7\% \leq W \leq 9\%$; $1,3\% \leq P \leq 30\%$; $7\% \leq V^{daf} \leq 45\%$; $30 \text{ м} \leq H \leq 1050 \text{ м}$ (W – аналитическая влажность, %; P – пористость, %; V^{daf} – выход летучих, %; H – глубина залегания пласта в точке отбора пробы, м) нами получены результаты, отраженные на рис. 2.

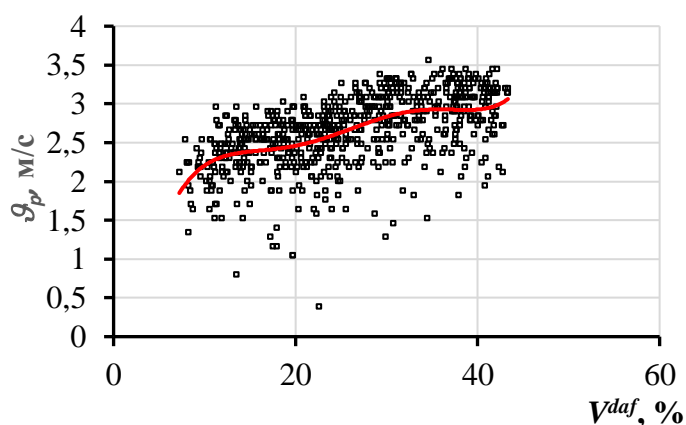


Рис. 2. Распределение скоростей прохождения продольных волн в углях по стадиям метаморфизма

Как видно из приведенных выше данных, скорости распространения продольных волн для углей имеют определенный статистический «разброс». Одной из причин такого «разброса» является распределение углей по стадиям метаморфизма, полученного авторами на основе [8]. На рис. 2 явно выделяются 2 интервала выхода летучих веществ, на которых скорости продольных волн имеют тенденцию к понижению: в области $\sim 20\%$ и 40% . Причем при $V^{daf} \approx 20\%$ скорости продольных волн имеют минимальное значение для каменноугольной стадии метаморфизма.

Средняя скорость (по модулю) трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков диаметром Δ определена из формулы (3) с учетом данных рис. 2, табл. 1 и представлена на рис. 3 и в табл. 2:

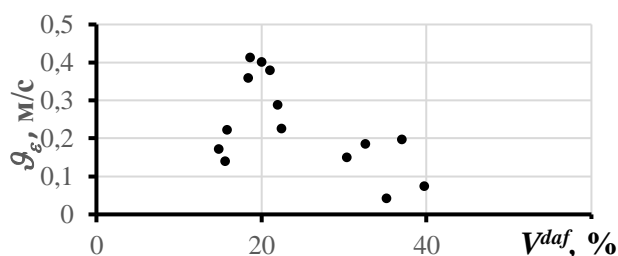


Рис. 3. Средняя скорость (по модулю) трансляционного движения «соударяющихся» геоблоков для разных стадий метаморфизма

Таблица 2

Скорости распространения продольной волны в геоблоках-носителях μ -волны ϑ_p и трансляционного движения ϑ_ε «соударяющихся» геоблоков для разных стадий метаморфизма

V^{daf} , %	ϑ_p , км/с	ϑ_ε , м/с
14,8	2,38	0,17
15,6	2,39	0,14
15,8	2,39	0,22
18,4	2,43	0,36
18,6	2,43	0,41
20	2,46	0,40
21	2,49	0,38
21,9	2,51	0,29
22,4	2,53	0,23
30,3	2,84	0,15
32,6	2,89	0,18
35,1	2,92	0,04
37	2,92	0,20
39,7	2,91	0,07

**Экспериментальное определение коэффициентов сорбции a , b
и калибровочных коэффициентов α и β**

Коэффициенты сорбции a , b определены для разных стадий метаморфизма (табл. 3). Распределение экспериментальных данных в [9] аппроксимируют следующие аналитические выражения для расчета коэффициентов a и b метаноемкости на основе уравнения Ленгмюра (7):

предельная метаноемкость-

$$a = -0,0012 \cdot (V^{daf})^3 + 0,091 \cdot (V^{daf})^2 - 2,25 \cdot V^{daf} + 35,7, \quad 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}; \quad (13)$$

коэффициент метаноемкости-

$$b = 3,9 \cdot (V^{daf})^{-0,3}, \quad 10^{-6} \text{ 1/Па}, \quad (14)$$

где V^{daf} - среднее значение выхода летучих веществ на глубине 100 м для свит Кузнецкого угольного бассейна.

Зависимости калибровочных коэффициентов α и β , вычисленных по (8) и (9) с учетом физико-химического инварианта μ_Δ^* для углей различных стадий метаморфизма, представлены на рис. 4.

Коэффициенты сорбции a , b для углей различных стадий метаморфизма

$V^{daf}, \%$	a	b
14,8	18,442	1,751
15,6	18,190	1,724
15,8	18,134	1,717
18,4	17,634	1,640
18,6	17,611	1,635
20	17,500	1,600
21	17,468	1,577
21,9	17,465	1,557
22,4	17,473	1,546
30,3	17,689	1,412
32,6	17,486	1,382
35,1	16,946	1,351
37	16,245	1,330
39,7	14,714	1,302

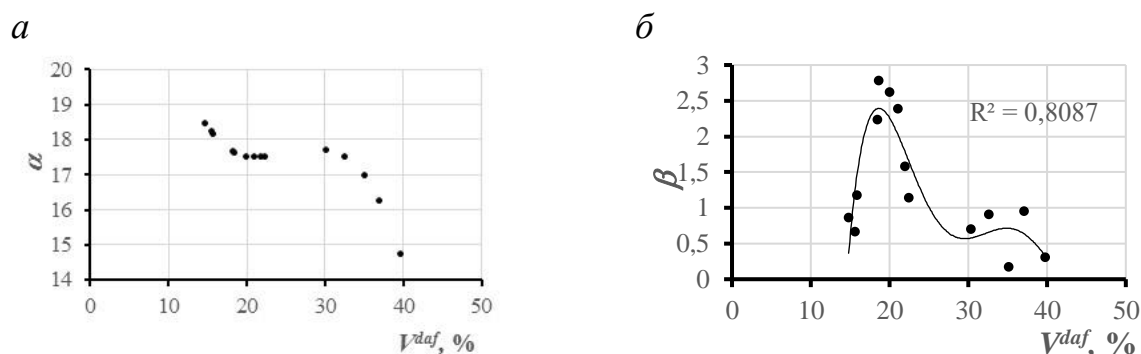


Рис. 4. Зависимости калибровочных коэффициентов α и β от выхода летучих веществ с учетом определенного для них значений физико-химического инварианта μ_{Δ}^*

Величины дисперсий выборки (табл. 4) экспериментальных данных как меры «разброса» значений некоторой оцениваемой величины x_i вычислялись по стандартной формуле:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1) , \quad (3.3.15)$$

где \bar{x} - выборочное среднее из n значений; S - стандартное отклонение выборки.

Дисперсия и стандартные отклонения калибровочных коэффициентов α и β для физико-химического инварианта μ_{Δ}^*

	α	β
Выборочное среднее	17,36	1,30
Дисперсия	0,86	0,66
Стандартное отклонение	0,93	0,81

Выводы и заключение

Таким образом, впервые определены калибровочные коэффициенты в операторе соответствия $\Omega\{\dots\}$ для уравнений (1) и (3), верифицированные в сравнении с имеющимися измерениями в лабораторных и натуральных экспериментах для углей всего метаморфического ряда. Установленные калибровочные коэффициенты характеризуются практическим постоянством, несмотря на разные стадии метаморфизма углей Кузбасса: коэффициент α имеет значение 17,36 с дисперсией 0,86, что составляет $\approx 5\%$ от выборочного среднего; коэффициент β равен 1,30 с дисперсией 0,66 ($\approx 50\%$). Значения полученных дисперсий весьма важны, т.к. позволяют учесть все многообразие основных стадий метаморфизма угольных месторождений Кузбасса в теории и прогнозе их выбросоопасности, т.е. учитывать реальные качества угольных пластов. На основе определения калибровочных коэффициентов связи между уравнением адсорбции Ленгмюра и кинематическим выражением В.Н. Опарина для волн маятникового типа по данным натуральных измерений на угольных месторождениях Кузбасса впервые установлены непосредственные количественные связи между нелинейными деформационно-волновыми и физико-химическими процессами, протекающими в реальных многофазных органогенно-насыщенных массивах горных пород, при нарушении их исходного напряженно-деформированного и термодинамического состояния источниками различного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опарин В. Н. К теоретическим основам описания взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в угольных пластах // ФТПРПИ. – 2017. – № 2. – С. 3–19.
2. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах: // ФТПРПИ. – Ч. 1. – 2012. – № 2. – С. 3–27; Ч. 2. – 2013. – № 2. – С. 3–46; Ч. 3. – 2014. – № 4. – С. 10–38; Ч. 4. – 2016. – № 1. – С. 3–49.
3. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф. и др. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. – Новосибирск: Наука, 2010. – 404 с.
4. Киряева Т.А. Исследование параметров структуры углей Кузбасса методом рентгеновской дифракции / Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018. Междунар.науч.конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений

полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиГ, 2018. – Т. 5. – С. 49–52.

5. <https://www.ngpedia.ru/pg4608076QpNuigz0001001822/>.

6. Свидетельство № 2018620264 на БД. Российская Федерация. Каталог метаноемкости углей Кузбасса / Киряева Т.А., Опарин В.Н.; Зарегистр. 13.02.2018 г.

7. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. – Новосибирск. Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. – 301 с.

8. Штумпф Г.Г., Рыжков Ю.А., Шаламанов В.А. и др. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. М.: Недра, 1994. 225 с.

9. Киряева Т. А. Разработка методов энергетического анализа и прогнозирования газодинамической активности углеметановых пластов Кузбасса – Riga, Latvia: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. – 332 с.

© В. Н. Опарин, Т. А. Киряева, 2021