УДК 550.3 + 551 + 622

DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26

РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ГЕОТОМОГРАФИИ. ЧАСТЬ II: ДИНАМИКО-КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА В НАПРЯЖЕННЫХ ГЕОСРЕДАХ И СЕЙСМОЭМИССИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

В.Н. Опарин¹, В.В. Адушкин^{1,2}, В.И. Востриков¹, В.Ф. Юшкин¹, Т.А. Киряева¹

 1 Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия, e-mail: oparin@misd.ru 2 Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия

Аннотация: В продолжение экспертно-аналитического обзора, анализа и обобщения современных научных достижений в области нелинейной геомеханики и геофизики, начатого в первой (I) части статьи, с целью обоснования нового научного направления в науках о Земле и горном деле, в частности: «Основы нелинейной геотомографии на волнах маятникового типа», в данной (II) части внимание обращено к выделению базового «формульного конструктора» для обработки комплексной экспериментальной информации для оценки динамико-кинематических характеристик волн маятникового типа, энергетическому критерию их возникновения и распространения в господствующем поле напряжений и деформаций, связи с классическими линейными сейсмическими волнами продольного (Р) и поперечного (S) типов; а также индуцируемыми землетрясениями, взрывами и иными механическими источниками нелинейных деформационно-волновых, сейсмоэмиссионных, массо-газообменных и физико-химических процессов в напряженных блочных средах и геоматериалах со сложной внутренней структурой. Большая роль в этом принадлежит отдельным, наиболее значимым, ранее достигнутым соавторами настоящей работы результатам поисковых исследований, опубликованных в разных изданиях, однако представленных в «разрозненном и концептуально не связанном между собой виде». То же относится и к наиболее важным результатам исследований других цитируемых в статье авторов оригинальных исследований. Приведены формализованные связи динамико-кинематических характеристик нелинейных упругих волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения с учетом энергетических характеристик источников их излучения, а также упругих модулей горных пород (коэффициенты Ламе, плотность структурных элементов геоматериалов, коэффициент Пуассона, модуль Юнга). Развивается спектроскопическая теория анализа связей между амплитудно-периодными характеристиками упругих волновых пакетов маятниковых волн и их вещественными носителями — геоблоками соответствующего им иерархического уровня, а также энергетическими уровнями излучаемой сейсмической энергии в канонической шкале иерархических представлений. Даны примеры записей развития нелинейных деформационно-волновых процессов — «носителей» маятниковых волн — в натурных условиях и при испытании различных геоматериалов на их нагружение до разрушения.

Ключевые слова: нелинейная геотомография, механико-математические основы, волны маятникового типа, блочно-иерархическое строение, спектроскопия, динамико-кинематические характеристики, напряженно-деформированное состояние, энергетическое условие

© В.Н. Опарин, В.В. Адушкин, В.И. Востриков, В.Ф. Юшкин, Т.А. Киряева. 2019.

возникновения и распространения маятниковых волн, каноническая связь сейсмоэнерговыделения с размерами геоблоков, массивы горных пород, источники излучения.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-17-01282).

Для цитирования: Опарин В. Н., Адушкин В. В., Востриков В. И., Юшкин В. Ф., Киряева Т. А. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть II: Динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмоэмиссионные процессы // Горный информационно-аналитический бюллетень. − 2019. − № 11. − С. 5−26. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26.

Experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part II: Dynamic and kinematic characteristics of pendulum waves in high-stress geomedia and processes of seismic emission

V.N. Oparin¹, V.V. Adushkin^{1,2}, V.I. Vostrikov¹, V.F. Yushkin¹, T.A. Kiryaeva¹

- ¹ Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, e-mail: oparin@misd.ru
- ² Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract: In continuation of the expert analysis, review and generalization of the modern scientific achievements in nonlinear geomechanics and geophysics in Part I of this article, with a view to iustifying a new trend in the geosciences and in mining, namely, Foundations of Nonlinear Geotomography Using Pendulum Waves, this Part II of the article focuses on the identification of a basic «formula designer» for processing of an integrated experimental information to estimate dynamic and kinematic characteristics of pendulum waves, on determination of energy criterion of pendulum wave origination and travel in the predominant field of stresses and strains, on finding the connection between the pendulum waves and P- and S-waves, induced earthquakes, blasts and other mechanical sources of nonlinear deformation—wave, seismic—emission, mass- and gas-exchange and physicochemical processes in high-stress blocky geomedia and geomaterials with complex internal structure. In this respect, the major role belongs to some research findings obtained by this article co-authors and published earlier though «discretely and conceptually unrelated.» The same is valid for the important results of the other researchers quoted in this article. The formalized connections between the dynamic and kinematic characteristics of the nonlinear elastic pendulum waves in highstress geomedia with hierarchical block structure are presented with regard to energy characteristics of the pendulum wave sources as well as elastic moduli of rocks (Lamé coefficient, density of structural elements of geomaterials, Poisson's ratio, Young's modulus). The spectroscopic analysis theory is developed for the connections between the amplitudes and periods of the elastic pendulum wave packets and their material carriers—geoblocks on the correspondent hierarchical levels, as well as with the levels of the emitted seismic energy on the canonical scale of hierarchical representations. The example records of the nonlinear deformation-wave processes—«carriers» of pendulum waves—in situ and in loading tests of different geomaterials to failure are given in the article.

Key words: nonlinear geotomography, mathematical and mechanical frameworks, pendulum waves, hierarchical block structure, spectroscopy, dynamic and kinematic characteristics, stress–strain analysis, energy condition of initiation and travel of pendulum waves, canonical connection between seismic energy emission and geoblock sizes, rock mass, emission sources.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 17-17-01282.

For citation: Oparin V. N., Adushkin V. V., Vostrikov V. I., Yushkin V. F., Kiryaeva T. A. Experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part II: Dynamic and kinematic characteristics of pendulum waves in high-stress geomedia and processes of seismic emission. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(11):5-26. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26.

Введение

В первой части настоящей статьи [1] на базе накопленного опыта экспериментально-теоретических исследований в области нелинейной геомеханики и геофизики конца минувшего и начала нынешнего столетий, дается обоснование необходимости организации нового научного направления для решения широкого круга задач горного дела и физики Земли — нелинейной геотомографии на волнах маятникового типа, обладающих широким диапазоном по своим динамико-кинематическим характеристикам распространения от их источников излучения в напряженных геосредах блочноиерархического строения. Здесь авторами обращалось особое внимание на то, что согласно коэффициенту сейсмического действия взрывов и землетрясений по акад. М.А. Садовскому, сейсмостанциями регистрируется обычно не более 1—5% упругой энергии очаговых зон разрушения горных пород, а значительная часть энергии расходуется на развитие нелинейных деформационноволновых процессов и образование зон напряженного состояния в породных массивах, обычно отмечающихся соответствующей им, достаточно сложной, картиной развития сейсмоэмиссионных процессов, приобретающих детерминированный характер [2, 3].

Такие сейсмоэмиссионные процессы, обусловленные нелинейными деформационно-волновыми процессами, как показано в [2—6] на различных примерах, могут быть описаны кинематическим выражением для сопряженных по размерам их вещественных носителей (геоблоков определенного иерархического уровня) групп волн маятникового типа при известном [2, 4] энергетическом условии их возникновения и распространения от источников излучения (землетрясения, горные удары, взрывы и проч.). В [1] также отмечено, что аналогом уравнения

эйконала, используемого в классической сейсмотомографии, может служить кинематическое выражение В.Н. Опарина для волн маятникового типа в нелинейной геотомографии.

В данной части статьи систематизированно представлены феноменологические основы спектроскопический теории волн маятникового типа, в рамках которой содержится необходимый «формульный конструктор» в виде функционального набора аналитических соотношений. позволяющих описывать сложные, нелинейные в своей основе, массо-энергообменные процессы в напряженных геосредах с детерминированным характером развития сопутствующих им сейсмоэмиссионных процессов [7]. В сейсмологии они обычно рассматриваются как случайные события с графиками повторяемости типа Гутенберга-Рихтера [8-10].

Однако применение энергетического подхода [2, 7] к описанию геомеханикогеофизического поведения сложных геосистем типа «энергонасыщенных» очаговых зон катастрофических (или крупных динамических) событий в напряженных массивах горных пород, как будет продемонстрировано далее, является вполне естественным и с необходимостью конструктивным. В рамках такого методологического подхода существенно облегчается решение очень важной задачи комплексной интерпретации многопараметрической лабораторной и натурной информации с позиций диагностики и контроля «уровней критичности» ответственных (несущих) элементов контролируемых горно-технических систем в течение всего срока их эксплуатации.

Этот подход, в соответствии с введенными в [1] понятиями, в значительной мере реализуется в направлениях «активной», а также «пассивной» геотомографии на волнах маятникового типа, предполагающей наличие детерминиро-

ванных связей, описываемых соответствующими функциональными соотношениями между пространственными картинами формирования и развития деформационно-волновых и сейсмоэмиссионных процессов, регистрируемых обычно разными геомеханико-геофизическими методами. В таких условиях энергетический анализ контролируемых (разнородных по «качеству» регистрируемой информации) параметров применяемыми измерительными системами становится в необходимой мере и практически единственным для обработки комплексной многопараметрической информации с позиций диагностики и прогнозирования возникновения и развития очаговых зон произошедших и грядущих разрушительных динамических событий в «энергонасыщенных» массивах горных пород. Они значительно отличаются от «нулевого уровня» по сумме потенциальной и кинетической энергий для составных структурных элементов [2].

О формализованных связях динамико-кинематических характеристик волн маятникового типа с напряженно-деформированным состоянием геосред

Научные основы определения динамико-кинематических характеристик нелинейных упругих волн маятникового типа достаточно подробно отражены в работах [1-7, 11, 12]. В этом направлении исследований получены важные экспериментально-теоретические результаты, связанные с аналитическим описанием маятниковых волн в зависимости от структурного строения, физико-механических свойств и вида напряженно-деформированного состояния горных пород, энергетических условий их возникновения и распространения, взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных и нефтегазовых пластах при «сопутствующих» этим волнам деформационно-волновых процессах; роли маятниковых волн при формировании очаговых зон разрушения горных пород естественного (землетрясения) и техногенного (горные удары, бурение скважин, технологические взрывы) происхождения.

В отмеченных работах результаты по развитию теории и практических приложений вносят существенный вклад в методологические основы и методы определения динамико-кинематических характеристик и скоростного диапазона волн маятникового типа от землетрясений, взрывов и импульсных источников, индуцирующих, в том числе, и газодинамическую активность на угольных шахтах [5].

Систематически развиваемые в настоящей работе в геотомографическом аспекте методология и методы экспериментального определения динамикокинематических характеристик нелинейных упругих волн маятникового типа подробно по отдельным своим аспектам изложены в цитируемых выше работах на примере рудных, нефтегазовых и угольных месторождений полезных ископаемых. В [5] отмечены ключевые моменты, необходимые для обработки и интерпретации экспериментального материала, относящегося к месторождениям полезных ископаемых, когда источником возникновения маятниковых волн становятся очаги природно-техногенных землетрясений (например, горно-тектонические удары или мощные технологические взрывы), а их последствием сейсмо-деформационные, газодинамические или иные физические события на рудниках, карьерах или угольных шахтах, «модулируемые» нелинейными деформационно-волновыми процессами, сопряженными с распространением пакетов «медленных» по скоростному диапазону маятниковых волн.

Далее концептуально последовательно и систематически выделим главные достижения по теории маятниковых волн, необходимые и перспективные, для развития как теоретических основ, так и практических приложений нелинейной геотомографии в ее «активном» и «пассивном» вариантах [1].

Кинематическое выражение для волн маятникового типа [2. 6]:

$$\vartheta_{v} = \frac{(1 + v[\sigma])\vartheta_{\varepsilon}\vartheta_{\rho}}{\vartheta_{\varepsilon} + v[\sigma]\vartheta_{\rho}}, \qquad (1)$$

где $\vartheta_{\rm v}$ — скорость распространения маятниковых волн; $\vartheta_{\rm p}$ — скорость распространения продольных волн в геоблоках-носителях маятниковой волны; $\vartheta_{\rm e}$ — средняя скорость (по модулю) трансляционного движения соударяющихся геоблоков диаметром Δ ; $v[\sigma]$ — структурный параметр геосреды, зависящий от напряженного состояния σ и аппроксимируемый параболической зависимостью на допредельной стадии деформирования в виде:

$$v[\sigma] = v_0 \left[2 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^2 \right], \tag{2}$$

где σ_0 — предел прочности структурных элементов размера Δ ; v_0 — минимальное значение параметра $v_{\Delta}(\delta)$ при действующем в заданном объеме горных пород виде напряженно-деформированного состояния:

$$V_{\Lambda}(\delta) \in (10^{-2} \div 10^{-1}) \mu_{\Lambda}(\delta),$$
 (3)

$$\mu_{\Lambda}(\delta) = \delta_{i}/\Delta_{i} \in [0.5 \div 2] \cdot 10^{-2} \ \forall \ i.$$
 (4)

Параметр $\mu_{\Delta}(\delta)$ по (3) и (4) описывает статистически инвариантный диапазон отношений между средними значениями «раскрытия» трещин $\delta_{\rm i}$ к диаметрам $\Delta_{\rm i}$ отделяемых ими структурных элементов горных пород i-го иерархического уровня. Параметр $v_{\Delta}(\delta)$ по (3) можно практически оценивать как [2]:

$$v_{\Delta}(\delta) \cong 10^{-1} \mu_{\Delta}(\delta).$$
 (5)

Энергетическое условие возникновения и распространения волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения [2, 4]:

$$\hbar = \frac{W}{M\vartheta_{\rho}^{2}} = \theta \cdot 10^{-9}, \, \theta \in 1 \div 4, \, M = \rho V, \, (6)$$

$$W = \alpha(V)[U_0 + W_k], \qquad (7)$$

где M — масса и V — объем очаговой зоны; U_0 — потенциальная и W_k — кинетическая энергии структурных геоблоков очаговой зоны разрушения с объемом V; $\alpha(V)$ — коэффициент сейсмического действия подземных взрывов по М.А. Садовскому [13]; ρ — плотность горных пород; ϑ_ρ — известные аналитические выражения для упругих волн продольного типа, зависящие от вида волноводных структур (одномерные, плоские, объемные), механических модулей их вещества — Юнга, коэффициента Пуассона и плотности.

Теоретические, связи между упругими модулями горных пород и скоростями распространения в них продольных (*P*) и поперечных (S) волн описываются известными формулами [14]:

$$\vartheta_{p} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad \vartheta_{s} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad (8)$$

где λ и μ — коэффициенты Лямэ, ρ — плотность горных пород.

Для изотропных геосред в практических целях обычно вместо (8) используются другие выражения— с применением коэффициента Пуассона ($\hat{\sigma}$), модуля Юнга (E) и плотности геоматериала (ρ):

$$\vartheta_{\rho}^{2} = \frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \hat{\sigma}}{\rho (1 + \hat{\sigma})(1 - \hat{\sigma})}, \qquad (9)$$

$$\vartheta_{s}^{2} = \frac{1}{2\rho} \cdot \frac{E}{1+\widehat{\sigma}} \,. \tag{10}$$

Из (9) и (10) следует, что

$$\left(\frac{\theta_s}{\theta_o}\right)^2 = \frac{1 - 2\hat{\sigma}}{2(1 - \hat{\sigma})}, \quad (11)$$

то есть между скоростями продольных и поперечных волн должна существовать довольно «жесткая» связь через коэффициент Пуассона (!).

Таким образом, по экспериментальным данным о значениях $\vartheta_{\rm p}$ и $\vartheta_{\rm s}$ можно оценивать «динамические модули» горных пород $\widehat{\sigma}$ и E:

$$\widehat{\sigma} = \frac{1}{2} \frac{\left(\vartheta_{s} / \vartheta_{p}\right)^{2}}{\left(\vartheta_{s} / \vartheta_{p}\right)^{2} - 1}, \quad (12)$$

$$e = \rho \cdot \vartheta_{\rho}^{2} \frac{\left(1 + \widehat{\sigma}\right)\left(1 - 2\widehat{\sigma}\right)}{1 - \widehat{\sigma}}, \quad (13)$$

при условии, что значения ρ определены.

Однако хорошо известно, что существует значительное отличие механических модулей геосреды, измеренных непосредственно экспериментальными «квазистатическими» геомеханическими методами, и их расчетными значениями (12), (13) по сейсмическим данным. Это нашло отражение во введенных в свое время понятиях «статические и динамические» модули упругости горных пород.

Несмотря на то, что попыток теоретического объяснения такого расхождения для обсуждаемых механических модулей геосреды (E, $\hat{\sigma}$) было много, тем не менее, убедительными их трудно считать до сих пор. Главная причина, как видится нам. лежит все-таки в понимании физической сути развития реальных деформационно-волновых и соответствующих им сейсмоэмиссионных волновых процессов, связанных с их «вещественными носителями» в геосредах [2]. С учетом этого обстоятельства, по-существу, и возникло новое экспериментально-теоретическое направление в нелинейной геомеханике и геофизике, посвященное открытию и развитию теории нелинейных упругих волн маятникового типа [7, 11].

Далее более подробно остановимся на значении именно этих «вещественных носителей» упругой энергии в напряженной геосреде, где велика роль ее блочно-иерархического строения, а следовательно, и реально существующих дефектов в виде тектонических разломов или трещин очень широкого диапазона размеров и геометрических форм, но имеющих вполне определенную между собой статистическую связь (3)—(5).

Как показано в [2, 11, 15], энергетические соотношения (6) и (7) оказываются справедливыми практически в любых нелинейных динамических процессах, описывающих движения структурных элементов в напряженных 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.

На «внешней поверхности» очаговой зоны в породном массиве таких динамических событий скоростная характеристика θ_{ϵ} в (1) непосредственно зависит от энергетической характеристики W из (7):

$$W_k \sim \frac{1}{2} \rho \cdot \Delta^3 \cdot \vartheta_{\varepsilon}^2 \simeq \frac{M \vartheta_{\varepsilon}^2}{2}$$
. (14)

В [11] показано, что при $\alpha(V)\cong 1.5\cdot 10^{-2}$, $W_{\rm k}=0$ — условии «порядкового» преобладания уровня действия литостатического давления $(U_{\rm o}>>W_{\rm k})$, а также при $3\cdot 10^3 \le 9_{\rm p} \le 6\cdot 10^3$ м/с на этой поверхности $9_{\rm e}\in 2.52-10$ м/с.

Для месторождений органической природы (угольные, нефтегазовые и др.) существует «операторное продолжение» $\Omega\{...\}$, связывающее между собой уравнения И. Ленгмюра (изотермы адсорбции) и В.Н. Опарина (кинематическое выражение для маятниковых волн [6]):

$$\Omega\{...\} \equiv \begin{cases}
A \to \vartheta_{v} \\
p \to \vartheta_{\varepsilon} \\
k \to \frac{1}{v[\sigma]\vartheta_{p}} \\
A_{*} \to \vartheta_{p}(v[\sigma] + 1)
\end{cases}, (15)$$

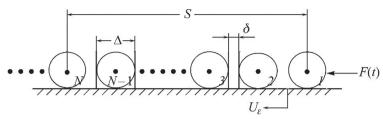


Рис. 1. Механическая модель к расчету скоростной характеристики $9_{_{V}}$ маятниковых волн; в сравнении с [4] структурные элементы кубической формы заменены на шаровые; F(t) — силовая характеристика, пропорциональная $W_{_{U}}(14)$

Fig. 1. Mechanical model to calculate velocity characteristic ϑ_v of pendulum waves; as against [4], cubic elements are substituted for ball elements of the structure; F(t)—force characteristic proportional to W_v (14)

$$A = A_* \frac{kp}{1 + kp} \,. \tag{16}$$

В (15) и (16) использованы обозначения: A — абсорбционный аналог изотермы мономолекулярной абсорбции (газов/жидкости); A_* — предельное значение A (максимальная абсорбция при заполнении абсорбентом пор и трещин); k — отношение скоростей абсорбции и удаления газа/жидкости из заданного объема пор и/или трещин (аналог соответствующего коэффициента в исходном идеализированном уравнении Ленгмюра).

Наличие формул (15) и (16), а также (1)—(4), устанавливает непосредственную связь между нелинейными деформационно-волновыми, массо-газообмен-

ными и физико-химическими процессами в многофазных напряженных геосредах блочно-иерархического строения, что осуществляется через «поршневой механизм» знакопеременного движения вещественных носителей пакетов маятниковых волн (показано на рис. 1—3). При этом происходит «модуляция» массо-газообменных и физико-химических процессов в массивах горных пород осциллирующим движением геоблоков между берегами отделяющих их трещин [1, 2, 6].

Механическая модель, приведенная на рис. 1, позволила получить кинематическое выражение (1) для расчета скоростей 9_{ν} маятниковых волн, изменяющихся существенным образом в зависимо-

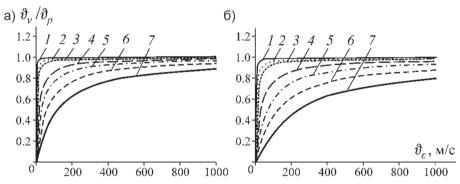


Рис. 2. Изменение относительной (к продольной) скорости маятниковых волн в зависимости от θ_{ϵ} и скорости продольных волн при $\theta_{\epsilon} = 3000$ м/c (a) и $\theta_{\epsilon} = 6000$ м/c (b): $1 - v = 10^{-4}$; $2 - v = 5 \cdot 10^{-4}$; $3 - v = 10^{-3}$; $4 - v = 5 \cdot 10^{-3}$; $5 - v = 10^{-2}$; $6 - v = 2 \cdot 10^{-2}$; $7 - v = 4 \cdot 10^{-2}$ Fig. 2. Variation in relative (to longitudinal) velocity of pendulum waves depending on θ and pendulum

wave velocity at (a) $9_p = 3000 \text{ m/s}$ and (b) $9_p = 6000 \text{ m/s}$: $1 - v = 10^{-4}$; $2 - v = 5 \cdot 10^{-4}$; $3 - v = 10^{-3}$; $4 - v = 5 \cdot 10^{-3}$; $5 - v = 10^{-2}$; $6 - v = 2 \cdot 10^{-2}$; $7 - v = 4 \cdot 10^{-2}$

сти от параметров $\vartheta_{_{\mathrm{D}}}$ и v. Это отображено на рис. 2. Данный рисунок показывает, что аномально высокий градиент изменения ϑ_{ν} для маятниковых волн по отношению к скоростям продольных волн $(9_{\rm p})$ наблюдается при $9_{\rm s} \le 10$ м/с (14) на «внешней поверхности» очаговой зоны. Из приведенных графиков рис. 2 для структурного параметра v (2), зависящего от σ, следует также большое влияние раскрытия трешин: чем меньше его величина, тем меньше наблюдаемое отличие скоростного диапазона маятниковых волн в сравнении со скоростным диапазоном для продольных P-волн. При v = 0(отсутствие границ раздела между структурными элементами) имеем $\vartheta_{\rm p} = \vartheta_{\rm v}$. Таким образом, изображенные на рис. 2 зависимости (1)—(4) иллюстрируют непосредственную кинематическую связь маятниковых волн как с размерами их вещественных носителей ($\Delta_{\rm i}$), дефектности горных пород ($\delta_{\rm i}$), уровня напряженности геосред (σ) и энергетики (W) источника их излучения.

Поскольку энергетическое условие возникновения и распространения маятниковых волн для их вещественных носителей размера Δ по (6) и (7) представлено в безразмерном виде, то оно справедливо и для любых по размеру таких носителей. Однако выделенный

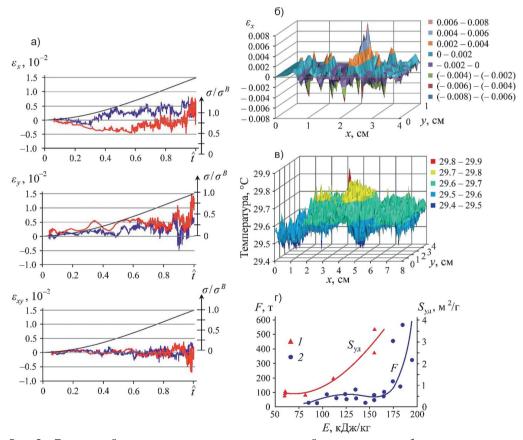


Рис. 3. «Поршневой механизм» возникновения нелинейных массо-газообменных процессов в напряженных углепородных геоматериалах (пояснения в тексте) по [6, 17] Fig. 3. «Piston mechanism» of nonlinear mass- and gas-exchange processes in high-stress coal-and-rock geomaterials (explanation in the text) by [6, 17]

энергетический диапазон возникновения и распространения маятниковых волн, очевидно, касается допустимого диапазона размеров геоблоков Δ_i , которые могут колебаться в маятниковом режиме в стесненных условиях напряженных массивов горных пород при определенных или заданных энергетических параметрах ($W_{\rm k}{\sim}F$) источника динамического события (землетрясение, взрыв, удар и т.д.).

Поршневой механизм возникновения нелинейных массо-газообменных процессов в угле-породных и других геоматериалах за счет деформационно-волновых и его теоретическое объяснение подробно описаны в работах [6, 16, 17]. Иллюстрация изменений данного механизма возникновения и характера связи температурных с деформационными изменениями в угольных образцах с гранитными прослойками на их торцевых поверхностях по мере одноосного нагружения до разрушения приводится на рис. 3.

Описанные здесь результаты физического моделирования и натурных экспериментов по изучению взаимодействия между геомеханическими, тепловыми и физико-химическими процессами при отработке угольных месторождений Кузбасса и выполненное обобщение позволили открыть неизвестный ранее «поршневой механизм» возникновения массогазообменных процессов в породных массивах, свидетельствующий о наличии генетической связи между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов различной стадии метаморфизма. Доказательство наличия такой («обратной») связи приводится в исследовании [17], позволившем предложить новые представления не только об условиях формирования очаговых зон подземных пожаров, но и о возможном механизме возникновения самовозгорания и взрыва метано-воздушных смесей в подземных выработках.

Так, комплексные экспериментальные исследования по анализу связей между деформационно-волновыми (рис. 3, *a*, *б*) и тепловыми (рис. 3, *в*) процессами, возникающими в структурированных геоматериалах, а также в угольных образцах разного состава при одноосном жестком нагружении со скоростью ~3,3 · 10⁻⁶ м/с до разрушения, позволили установить:

- с начальной стадии нагружения в них возникают квазистатические процессы внутреннего микродеформирования по компонентам $[(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}), 10^{-2}]$ обусловленные низкочастотным (~0,5—5 Гц) движением структурных элементов маятникового типа, топологически связанных между собою как вложенные «физические маятники». Амплитуда колебаний возрастает (рис. 3, a) с увеличением σ/σ^B уровня относительных напряжений во время их нагружения до разрушения $\hat{t} = t/t^B$, t текущее время; t^B время достижения предела прочности σ^B ;
- картина распределения по сканируемой поверхности (x, y) экстремумов микродеформаций (рис. 3, δ по ϵ_x) и изменений температуры (рис. 3, ϵ) определяют линейные размеры структурных неоднородностей.

При этом, как оказалось, существует статистически значимая связь между уровнями приращения температуры в угольных образцах при нагружении до разрушения, их прочностью на одноосное сжатие, выходом летучих веществ и внутренней энергией релаксации метаноносности угольных пластов в натурных условиях (!). Так, на рис. З, г приведены зависимости удельной поверхности угля S_{yA} и силы внезапных выбросов F от внутренней энергии углеметана E, построенные по соответствующим данным анализа выбросов угля и газа Кузбасса.

Наличие экспериментально установленных связей между амплитудно-периодными спектрами маятниковых волн и размерами их вещественных носителей (структурными элементами горных пород) с учетом достаточно универсального закона «квантования» структурных отдельностей [18]:

$$\Delta_i = \Delta_0 \left(\sqrt{2} \right)^i, \quad \Delta_0 \cong 2,5 \cdot 10^6 \, \mathrm{M}, \quad (17)$$
 $i \in N$ — целые положительные и отрицательные числа (порядок размерностей), либо $\Delta_{i+1} / \Delta_i \cong \sqrt{2} \forall_i$.

Как подчеркнуто в [18], зависимость (17) несет важный методологический смысл, заслуживающий более глубоких исследований с привлечением методов энергетического анализа. Ниже покажем полезность использования этого соотношения как для выделения спектрального состава маятниковых волн, так и для обоснования шага «квантования» уровней сейсмоэнерговыделения, что принципиально для целей сейсмического районирования [2]. Так, отмеченными экспериментально-теоретическими исследованиями установлены факты:

- возникновения поступательного и вращательного осциллирующих движений структурных элементов горных пород и геоматериалов в стесненных условиях напряженных массивов горных пород либо искусственно задаваемых напряжений на границах образцов горных пород, рис. 3. Следовательно, они обладают кинетической энергией (рис. 1);
- волны маятникового типа для их вещественных носителей от субмолекулярного уровня и выше можно моделировать как «соударяющиеся», сосредоточенные нелинейно, упруго взаимодействующие массы с элементами «внутреннего» деформирования;
- спектральный состав упругих волновых пакетов для волн маятникового типа имеет ярко выраженный канонический спектр (в векторном представлении дано в [11]):

$$f_i = (\sqrt{2})^i f_0, \ i = 0, \pm 1, \pm 2, ...; \ f_0 = \frac{\theta_p}{2\Delta},$$
(18)

где $\vartheta_{\rm p}$ — скорость распространения продольной волны в геоблоке — вещественном носителе нелинейной упругой волны диаметром Δ ;

• каноническая по [18] структура спектра маятниковых волн (18) естественным образом связана с законом «квантования» (17) структурных отдельностей горных пород и геоматериалов. Действительно, подстановка вместо Δ в формулу (18) для базовой частоты f_0 канонических размеров Δ_i из (17) дает выражение для f_i из (18).

Важно отметить, что наличие канонического вида связей (18) подсказывает идею для оригинального метода обработки амплитудно-периодных спектров маятниковых волн — посредством «свертки» по индексу i для определения размеров их «базовых» вещественных носителей (Δ_0).

Это направление исследований и разработок следует рассматривать как имеющее большое практическое значение, что обусловлено потребностями:

- иметь конкретные оценки размеров «работающих» $\Delta_{\rm j}$ блоков как вещественных носителей маятниковых волн, индуцируемых соответствующими источниками их возмущения (рис. 3) и представленных совокупностью структурных элементов определенных иерархических уровней. Последние зависят также от энергетических характеристик таких источников по (6), (7), (14);
- поиска формализованных связей между размерами «работающих» блоков и энергетическими классами сейсмособытий с учетом коэффициента α(V) по М.А. Садовскому (7).

Эти аспекты относятся непосредственно к определению скоростных характеристикам движения «работающих» блоков — носителей маятниковых волн и индуцируемым ими сейсмоэмиссионным процессам в напряженных массивах горных пород.

О канонической связи энергетических классов сейсмособытий с размерами релаксирующих геоблоков

Детерминированная связь по линейным размерам (Д;) «работающих» геоблоков с энергетическими классами сопутствующих им движениям в стесненных условиях напряженных массивов горных пород с учетом коэффициента $\alpha(V)$ действия взрывов и землетрясений по М.А. Садовскому [13] приведена в работе [2] с использованием концентрационного критерия прочности твердых тел по С.Н. Журкову [19, 20] в канонической шкале иерархических представлений [18]. Из-за принципиальной значимости данного результата для развития основ «пассивной» геотомографии на волнах маятникового типа [1], остановимся на нем более подробно, следуя [2]. В этой работе выполнен комплексный анализ и дано крупное теоретическое обобщение в области современных достижений нелинейной геомеханики и геофизики по физике и механике формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в природных и горнотехнических системах. Установлена формализованная связь между концентрационным критерием прочности твердых тел по С.Н. Журкову, экспериментальным критерием разрушения подземных выработок в напряженных блочных геосредах с изменяющимися коэффициентами сцепления между структурными элементами (геоблоками) и канонической структурой спектрального состава волн маятникового типа по В.Н. Опарину, а также фактором «дальнодействия» подземных взрывов по М.А. Садовскому и В.В. Адушкину.

Обоснована также необходимость более активного развития энергетического подхода к описанию процессов трансформации потенциальной упругой энергии очаговых зон катастрофических событий в кинетическую энергию движения составляющих их структурных элементов. Так, например, согласно кинетической концепции прочности твердых тел по С.Н. Журкову, динамическим явлениям в горных породах предшествует достаточно длительный по времени процесс деформирования и подготовки разрушения. Собственно разрушение твердого тела (в том числе в очаге) есть результат кинетического (термофлуктуационного) процесса — от зарождения через накопление к объединению микродефектов в «магистральную» трещину.

Имеются многочисленные экспериментальные данные по таким процессам в различных твердых телах (металлы, стекла, полимерные соединения, горные породы). Они показали, что по достижению объемной концентрации трещин значений, при которых среднее расстояние между соседними дефектами < L > в е раз больше их среднего размера < y >, последние начинают укрупняться.

Соответствующее значение для такой концентрации описывается в виде:

$$\frac{\langle L \rangle}{\langle y \rangle} = \frac{1}{\sqrt[3]{X_c}} \approx e \tag{19}$$

для x_{c} — критического значения концентрации трещин.

В [2] отмечено, что с относительным расхождением менее 5% число $e \approx 2,72$ можно заменить на $(\sqrt{2})^3 \approx 2,83$. Этот «переход—поправка» на самом деле оказался тем «мостиком», который и обеспечил искомую связь между до сих пор «автономно» развивавшимися теорией волн маятникового типа и кинетической концепцией прочности твердых тел, но уже с учетом иерархического строения структурных уровней горных пород и геоматериалов.

Действительно, с введением указанной поправки (по сути — операции дискретизации), уравнение (19) представимо в виде

$$\frac{\langle L \rangle}{\langle y \rangle} = \frac{1}{\sqrt[3]{x_c}} \approx (\sqrt{2})^3 \,. \tag{20}$$

Акт «укрупнения» растущих трещин естественно интерпретировать как механизм формирования структурной иерархии горных пород и их массивов, тогда из уравнения (20) следует, что в блоках кубической формы объемом < L > 3 будет содержаться примерно $(\sqrt{2})^9$ блоков кубической формы объема < y > 3:

$$\frac{\langle L \rangle^3}{\langle y \rangle^3} \approx (\sqrt{2})^9 = \chi \approx 22,63 \approx 23. (21)$$

В плоском случае соотношение для площадей формирующихся фракталей записывается в виде:

$$\frac{\langle L \rangle^2}{\langle y \rangle^2} \approx (\sqrt{2})^6 = 8. \tag{22}$$

Необходимо также выделить заключение авторов [2] о том, что выражение (21) свидетельствует о механическом происхождении коэффициента «акустической радуги» у, который был введен феноменологически в рамках развития теории волн маятникового типа [11], а выражение (22) практически совпадает с ранее введенным В.Н. Опариным критерием «схлопывания» подземных полостей в напряженных геосредах блочного строения, а также с параметром «дальнодействия» подземных взрывов по М.А. Садовскому и В.В. Адушкину Согласно последнему, локальные механические проявления необратимого характера происходят до расстояний (8-10)R, где R — радиус зоны взрывного разрушения породы [21].

Как показано в [22], энергетические условия возникновения волн маятникового типа и геомеханических квазирезонансов в процессах разрушения горных пород в очаговых зонах землетрясений и взрывов разной мощности статистически совпадают и определяются выражениями (6) и (7).

В качестве важного следствия развиваемой в [18] концепции о блочно-иерархическом строении массивов горных пород в каноническом представлении и установленной М.А. Садовским и др. [13] связи между объемами горных пород и излучаемой ими сейсмической энергии от землетрясений и взрывов является возможность аналитического описания энергетических уровней разрушения массивов горных пород, в том числе в процессах сейсмоэнерговыделения из очаговых зон катастрофических событий. Действительно, имеют место следующие соотношения для иерархически самоорганизованных систем:

• структурные отдельности Δ_i по своим линейным размерам представимы в виде их канонического по [18] ряда:

 $\Delta_{i} = \Delta_{0} (\sqrt{2})^{i}$, i — положительные и/или отрицательные целые числа; (23)

• их объемы в кубическом представлении равны

$$V_i = V_0 (\sqrt{2})^{3i}$$
 , $V_0 = \Delta_0^3 (\Delta_0 - \text{опорное значение});$ (24)

• энергия сейсмособытий по М.А. Садовскому [18] пропорциональна (с учетом коэффициента α(V) из (7)) объемам их очагов; следовательно, принимая эти объемы пропорциональными V₂, имеем:

$$W_i = W_0(\sqrt{2})^{3i}$$
, так как $W_i \sim V_i$; (25)

• в логарифмическом представлении с основанием $\sqrt{2}$ выражение (25) имеет вид:

 $\log_{\sqrt{2}}\left(\frac{W_i}{W_0}\right) = 3i, \ \forall_i;$ (26)

• выражение (26) означает, что і-й иерархический уровень сейсмоэнерговыделения при известном (или заданном!) W_о определяется формулой:

$$i = \frac{1}{3} \log_{\sqrt{2}} \left(\frac{W_i}{W_0} \right). \tag{27}$$

Следовательно, для отнесения динамических событий в *i-*й энергетический класс можно использовать сейсмозаписи, для которых выполняется условие:

$$i = \left[\frac{1}{3}\log_{\sqrt{2}}\left(\frac{\tilde{W}}{W_0}\right)\right]; [...]$$
 — оператор выделения целой части числа. (28)

Здесь \tilde{W} — энергия динамического события по сейсмическим записям, а W_0 — определенным образом задаваемое опорное (или референтное) значение уровня сейсмоэнерговыделения, которому присваивается «нулевой» иерархический уровень в канонической шкале иерархических представлений (24).

Результат (28) имеет важное значение при выборе шага квантования изолиний сейсмоэнерговыделения для построения энергетических карт формирующихся очаговых зон землетрясений и горных ударов, а также при геодинамическом районировании поверхности Земли. В данном случае устанавливается прямая связь уровней сейсмоэнерговыделения с объемными размерами естественных отдельностей релаксирующих массивов горных пород.

О количественной оценке энергетического вклада тектонических и геомеханических полей в развитие сейсмоэмиссионных процессов

Как отмечено в [2], важнейшее из следствий формул (6), (7) и приведенных ниже (29), (30) — это возможность количественной оценки энергетического вклада геодинамических полей и геомеханических процессов, индуцируемых техногенной деятельностью, в наведенную сейсмичность. В формулах (6), (7) он определяется суммарно — параметром W, куда равноправно входят как «упругий потенциал» очаговой зоны U_0 , так и кинетическая энергия движения составляющих ее структурных элементов геоблоков $W_{\rm k}$ [4].

При медленно протекающих тектонических процессах в сравнении с техногенной деятельностью «упругий потенци-

ал» U_0 на достаточно больших глубинах от поверхности Земли определяется в основном господствующим полем литостатических и тектонических напряжений, а $W_{\rm k}$ — вкладом от техногенной деятельности либо энергетическим «фоном» от удаленных крупных землетрясений, взрывов или иных механических источников.

В более общем случае энергетические параметры $U_{\rm 0}$ и $W_{\rm k}$ можно (условно) представить в виде сумм [2]:

$$U_0 = U_0^T + U_0^G ; (29)$$

в $U_0^{\ \mathrm{T}}$ учитываются литостатическая и тектоническая компоненты тензора напряжений;

$$W_{\nu} = W_{\nu}^{T} + W_{\nu}^{G}$$
 (30)

Верхними индексами здесь отмечены, соответственно, общая геотектоническая (*T*) и геомеханическая (*G*) составляющие полей напряжений и деформаций. Под «геомеханической» составляющей понимается «локальный» вклад от техногенной деятельности при разработке месторождений полезных ископаемых, оборонном или гражданском строительстве.

Согласно используемому энергетическому критерию объемного разрушения горных пород, условия (6) и (7) одновременно описывают и энергетический критерий возникновения в объеме горных пород V геомеханических квазирезонансных явлений, в основе которых лежит переход накопленной упругой энергии от сил горного давления в кинетическую энергию движения геоблоков — носителей маятниковых волн.

Важно подчеркнуть, что с энергетическим условием возникновения геомеханических квазирезонансов связано, в свою очередь, проявление эффекта аномально низкого трения в блочных средах [11]. Сопряженные с техногенной деятельностью сейсмические события называют обычно индуцированными. Механизмы их проявления связывают с

изменениями напряженно-деформированного состояния, как правило, многофазной геосреды сложного строения в результате «техногенного массообмена» в пределах определенных объемов массивов горных пород. Подобного рода виды деятельности человека, безусловно, связаны и с нарушением исходного поля тектонических напряжений и деформаций массивов горных пород для конкретных регионов Земли.

Как отмечалось в [2] для обозначения «техногенной сейсмичности», многие авторы пользуются разной терминологией: вызванная, наведенная, генерированная, индуцированная, возбужденная и др. Касаясь доминирующего механизма подобного рода сейсмоэмиссионных процессов, нередко используются термины «спусковой механизм», «спусковой крючок», «триггерный эффект».

По сути дела, энергетические представления (6), (7), (29), (30) количественно описывают все возможные случаи индуцированной сейсмичности и, фактически, их можно отнести в группу, называемую В.В. Адушкиным и В.Н. Опариным в [2] «сейсмоэмиссионными событиями интерференционного типа». Отмеченные энергетические условия в данном случае включают совместное влияние геодинамических (тектонических) и локальных геомеханических (техногенных) полей. Уровни энергетического вклада геомеханических и геодинамических полей зависят от того, в каком по геодинамической активности районе Земли ведутся горные работы и иные виды техногенной деятельности. Для платформенных и горно-складчатых областей они могут быть весьма отличными.

В качестве важного вывода выполненных исследований следует отметить, что наличие сейсмического фона в земной коре от искусственных или естественных источников в условиях синфазности его спектра с колебательным спектором

структурных элементов формирующейся очаговой зоны концентрации напряжений, при выполнении условий (6), (7), последняя способна эволюционировать в акустически активное состояние с переходом накоплений упругой энергии очаговой зоны в кинетическую энергию движения составляющих ее структурных элементов — в виде нелинейных геомеханических квазирезонансов с сопутствующим излучением продольных, поперечных и маятниковых волн [2].

Отмеченый выше результат по условиям перехода накапливаемой в очаговой зоне упругой энергии в кинетическую энергию движения составных структурных элементов получил свое экспериментальное подтверждение также и с использованием методов физического моделирования. В [16] изучалось поведение структурных элементов горных пород в их очаговых зонах разрушения или будущих катастрофических событий на примере образцов, обладающих структурной неоднородностью в виде соответствующих минералогических включений. В процессе их одноосного нагружения до разрушения детально исследованы особенности распространения и эволюции напряженно-деформированного состояния на микроуровне по рабочим поверхностям породных образов с помощью лазерного измерительного оптико-телевизионного комплекса ALMEC-tv.

Здесь экспериментально установлено (проиллюстрировано на рис. 4—6):

• при одноосном нагружении призматических образцов песчаника, мрамора и сильвинита (на прессовой установке Instron-8802 в режиме жесткого нагружения со скоростями перемещения подвижного захвата 0,02—0,2 мм/мин) при определенном уровне напряжений возникают низкочастотные процессы внутреннего микродеформирования, генерируемые медленными (квазистатическими) силовыми воздействиями, а амп-

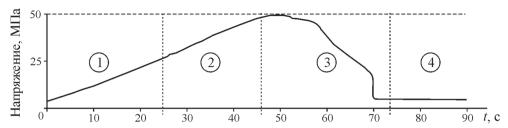


Рис. 4. Постадийная (1, 2, 3, 4) диаграмма зависимости напряжения от времени нагружения образца

Fig. 4. Stage-by-stage (1, 2, 3, 4) diagram of stress versus loading time in samples

литуда существенно зависит от стадии макронагружения;

- когда напряжения в образцах геоматериалов не превышают 0,5 предела прочности, колебания компонент микродеформаций практически отсутствуют (стадия 1);
- когда задаваемые напряжения принимают значения от 0,5 до 1 предела прочности (стадия 2), амплитуды колебаний микродеформаций существенно возрастают, включая ниспадающую стадию 3; частота колебаний микродеформаций составляет f = 0,5—4 Гц (стадия 3);
- на стадии 4 остаточной прочности — амплитуды колебаний компонент микродеформаций резко уменьшаются (в 3—5 раз) относительно таковых на стадиях 2 и 3;

В элементах сканируемой поверхности породного образца, покрывающих область с будущей трещиной, амплитуды скоростей микродеформаций e', превы-

шают аналогичные для областей поверхности неразрушаемого геоматериала в разы. В ряде случаев отмечается тенденция значительного роста скорости деформирования с увеличением нагрузки.

Для обработки экспериментальных данных спекл-фотографий поверхностей образцов горных пород при их нагружении до разрушения впервые в [18] введена энергетическая функция сканирования деформационно-волновых процессов. В силу ее большого прикладного значения на этом мы остановимся более подробно в четвертой части настоящей работы. С ее применением экспериментально доказана гипотеза о том, что при определенном уровне нагружения образцов горных пород внутри них возникают синфазные и антифазные осциллирующие движения структурных элементов геоматериалов в стесненных условиях. Аналогичные результаты [17] получены для образцов горных пород и

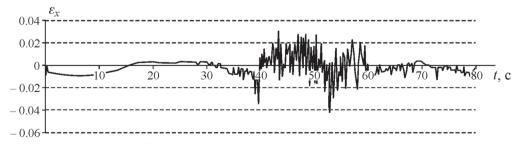


Рис. 5. Диаграмма средней микродеформации элементарного участка (фрагмента) поверхности образца в продольном (x) направлении — вдоль оси нагружения по [16]

Fig. 5. Diagram of average microstrain $\,$ of sample surface element (fragment) in the line of x along the axis of loading by [16]

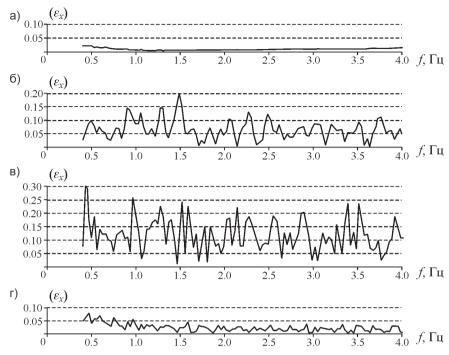


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика для продольной компоненты микродеформации по стадиям деформирования: 1-(a); 2-(b); 3-(b); 4-(r); стадии 1-4 нагружения даны согласно рис. 4 Fig. 6. Amplitude–frequency response for longitudinal microstrain per stages of deformation: 1-(a); 2-(b); 3-(v); 4-(g); loading stages 1-4 are in accord with 4

угля Кузбасса в условиях их двухосного нагружения до разрушения. Полученные результаты имеют принципиальное значение при определении механизма трансформации накапливаемой горными породами в очаговых зонах катастрофических событий потенциальной упругой энергии в кинетическую энергию движения их составных структурных элементов. В следующей части статьи значительное внимание будет уделено современным достижениям по созданию специализированных измерительно-вычислительных комплексов мониторингового контроля нелинейных сейсмо-деформационных процессов в натурных условиях массивов горных пород, с примерами записей соответствующих им волновых пакетов.

В заключение настоящей части статьи следует отметить, что достаточно обшир-

ный иллюстративный материал по сейсмо-деформационным записям упругих волновых пакетов для маятниковых волнот источников их излучения разных энергетических классов (вплоть до крупных землетрясений в районе оз. Байкал) приведен в работах [2, 5, 11, 12, 22 и др.]. Здесь же ограничимся всего лишь одним примером, коррелирующим со «смысловой нагрузкой» данных, представленных на рис. 3—6.

Наглядной иллюстрацией тому служат первые работы в этом направлении с использованием базовой конструкции продольного многоканального скважинного деформометра оптоэлектронного типа МОЭД-1п [22]. Это — пример, показывающий большое различие между натурными записями упругих волновых пакетов, регистрируемых сейсмическим и деформационным каналами от горно-

го толчка, произошедшего на некотором удалении от горной выработки на руднике «Октябрьский» Норильского месторождения (рис. 7).

Как видно из рисунка, в данном случае (расстояние между смежными датчиками ВМ равно 1,5 м; сейсмический канал совмещен с приборным комплексом МОЭД-1п) с начала регистрации сейсмодеформационным комплексом («О»), с первым зарегистрирован волновой пакет из продольных и поперечных волн, по сути — в «поляризованном» виде (~6,6 с). Длительность его на порядок и более меньше, чем для индуцированной толчком маятниковой волны.

Затем оптоэлектронными датчиками прибора МОЭД-1п (их удаления от контура выработки в глубь массива отвечают последовательности: ВМ1, ВМ2, ..., ВМ5) регистрируется приход «медленной волны» маятникового типа, начиная с «приконтурного» (BM1; \sim 40 c) к удаленному в глубь массива (ВМ5; ~360 с) — так же в «поляризованном» виде. Поскольку место локализации горного толчка в эксперименте заранее не было известно, кажущаяся скорость распространения маятниковой волны вдоль наблюдательной скважины (рис. 8) по годографу ее первых вступлений оценена диапазоном ~5÷8 см/с. При этом скоростная зависимость регистрируемой волны с удалением от контура выработки качественно отражает поведение радиальной компо-

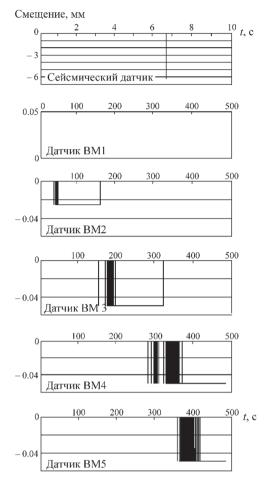
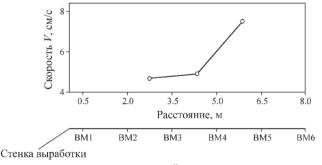


Рис. 7. Графики смещения датчиков по скважине В от горного толчка в окрестности выработки (Норильское месторождение)

Fig. 7. Displacement plots of sensors in borehole B during rock shock nearby a mine tunnel (Norilsk deposit)



Puc. 8. Скорость распространения маятниковой волны от толчка вокруг горной выработки Fig. 8. Pendulum wave velocity due to shock in rock mass around a tunnel

ненты тензора напряжений вокруг подземной выработки. Направление движения маятниковой волны от контура выработки в глубь массива свидетельствует о том, что очаг горного толчка находился, вероятно, в непосредственно прилегающей приконтурной зоне. В работах [23] лазерными деформографами ИЛФ СО РАН зарегистрированы от землетрясений в районе оз. Байкал маятниковые волны так называемого «квазиметрового» скоростного диапазона (0,43—1,76 м/с).

Затронутым авторами в настоящей части статьи вопросам в последние годы уделяется пристальное внимание многими российскими и зарубежными исследователями [24–32 и др.).

Выводы

Таким образом, в данной части настоящей статьи в продолжение экспертно-аналитического обзора, анализа и обобщения современных научных достижений в области нелинейной геомеханики и геофизики, начатого в ее первой (I) части, с целью обоснования нового научного направления в науках о Земле и горном деле, в частности: «Основы нелинейной геотомографии на волнах маятникового типа», авторами главное внимание обращено к выделению базового «формульного конструктора» для обработки комплексной экспериментальной информации для оценки динамико-кинематических характеристик волн маятникового типа, энергетическому критерию их возникновения и распространения в господствующем поле напряжений и деформаций, связи с классическими линейными сейсмическими волнами продольного и поперечного типов; а также с индуцируемыми землетрясениями, взрывами и иными механическими источниками нелинейных деформационно-волновых, сейсмоэмиссионных, массо-газообменных и физико-химических процессов в напряженных блочных средах и геоматериалах со сложной внутренней структурой. Большая роль в этом принадлежит отдельным, наиболее значимым, ранее достигнутым соавторами настоящей работы и другими исследователями научным результатам, опубликованным в разных изданиях, однако представленных в разрозненном и концептуально не связанном между собой виде.

Так, авторами систематизированно представлены феноменологические основы спектроскопический теории волн маятникового типа, с отражением необходимого «формульного конструктора» в виде функционального набора аналитических соотношений, позволяющего описывать сложные, нелинейные в своей основе, массо-энергообменные и физико-химические (для органо-минеральных геоматериалов) процессы в многофазных напряженных геосредах с детерминированным характером развития сопутствующих им сейсмо-газо-эмиссионных процессов. Даны иллюстрации подобного рода процессов по экспериментальным данным. Важное значение придается установлению аналитических связей между энергетическими классами сейсмособытий с размерами геоблоков, трансляционные и вращательные движения которых в стесненных условиях напряженных геосред ассоциируются с сейсмоэнерговыделениями в канонической шкале иерархических представлений геомеханико-геофизической информации. Даны аналитические выражения для количественной оценки энергетического вклада глобальных тектонических и локальных геомеханических полей в развитие сейсмоэмиссионных процессов для массивов горных пород.

В работе принимали участие:

Усольцева Ольга Михайловна— канд. физ.-мат. наук, заведующий, ЦКП ГГГИ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала CO PAH, e-mail: usoltseva57@mail.ru;

Мулев Сергей Николаевич — зам. директора по науке, АО «Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела» — Межотраслевой научный центр ВНИМИ.

Потапов Вадим Петрович — д-р техн. наук, профессор, директор, Кемеровский филиал Института вычислительных технологий СО РАН, e-mail: vadimptpv@gmail.com.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Опарин В. Н., Адушкин В. В., Востриков В. И., Усольцева О. М., Мулев С. Н., Юшкин В. Ф., Киряева Т. А., Потапов В. П. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть І: Формулировка и обоснование задачи исследований // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 1. С. 5—25. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25.
- 2. Adushkin V. V., Oparin V. N. From the Alternating-Sign Explosion Response of Rocks to the Pendulum Waves in Stressed Media // J. of Mining Science, P. I: 2012, Vol. 48, No. 2, pp. 203—222; P. II: 2013, Vol. 49, No. 2, pp. 175–209; P. III: 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 623–645; P. IV: 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 1–35.
- 3. *Oparin V.N.*, *Tapsiev A.P.*, *Vostrikov V.I.*, et al., On Possible Causes of Increase in Seismic Activity of Mine Fields in the Oktyabrsky and Taimyrsky Mines of the Norilsk Deposit in 2003. Part I: Seismic Regime // J. of Mining Science, 2004, Vol. 40, No. 4, pp. 321—338.
- 4. Oparin V. N., Simonov B. F. Nonlinear deformation-wave processes in the vibrational oil geotechnologies // J. of Mining Science, 2010, Vol. 46, No. 2, pp. 95—112.
- 5. Oparin V. N., Adushkin V. V., Kiryaeva T. A., Potapov V. P. Tyukhrin V. G., Glumov A. V. Effect of Pendulum Waves from Earthquakes on Gas-Dynamic Behavior of Coal Seams in Kuzbass // J. of Mining Science, 2018, Vol. 40, No. 1, pp. 3—14.
- 6. Oparin V.N. Theoretical Fundamentals to Describe Interaction of Geomechanical and Physicochemical Processes in Coal Seams // J. of Mining Science, 2017, Vol. 53, No. 2, pp. 201–215.
- 7. Опарин В. Н. Волны маятникового типа и «геомеханическая температура» / Труды 2-ой Российско-Китайской международной конференции «Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах». Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. С. 169—172.
 - 8. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир. 1979. 388 с.
- 9. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1. М.: Мир, $1983.-519~\mathrm{c}.$
 - 10. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Hayka, 1993. 314 с.
- 11. Опарин В.Н., Симонов Б.Ф., Юшкин В.Ф., Востриков В.И., Погарский Ю.В., Назаров Л.А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. Новосибирск: Наука, 2010. 404 с.
- 12. Wang K., Oparin V.N. Study on recognition of pendulum-type wave propogation in block rock mass // Journal of Advanced Oxidation Technologies. 2018, Vol. 21, Jssue 2, pp. 95—110.
- 13. Садовский М.А., Кедров О. К., Пасечник И.П. О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // Δ AH. 1985. т. 283. № 5. С. 1153—1156.
 - 14. *Гурвич И. И., Боганик Г. Н.* Сейсмическая разведка. М.: Недра, 1980. 551 с.
- 15. Опарин В. Н., Тимонин В. В., Карпов В. Н., Смоляницкий Б. Н. О применении энергетического критерия объемного разрушения горных пород при совершенствовании технологии ударно-вращательного бурения скважин // ФТПРПИ. 2017. № 6. С. 81—104.
- 16. Oparin V. N., Usol'tseva O. M., Semenov V. N., Tsoi P. A. Evolution of stress—strain state in structured rock specimens under uniaxial loading // J. of Mining Science, 2013, Vol. 49, No. 5, pp. 865—877.
- 17. Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Usol'tseva O.M. Nonlinear deformation-wave processes in various rank coal specimens loaded to failure under varied temperature // J. of Mining Science, 2015, Vol. 51, No 4, pp. 641—658.
- 18. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. Новосибирск: Наука, 2011. 259 с.

- 19. *Журков С. Н.* Кинетическая концепция прочности твердых тел (термофлуктуационный механизм) // Вестник АН СССР. 1968. № 3. С. 46—52.
- 20. Журков С. Н., Куксенко В. С., Петров В. А. О прогнозировании разрушения горных пород // Физика Земли. 1977. № 6. С. 11—18.
- 21. Садовский М.А., Адушкин В.В., Спивак А.А. О размере зон необратимого деформирования при взрыве в блочной среде / Избранные труды. М.: Наука, 2004. С. 109—115.
- 22. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород / Отв. ред. В.Л. Шкуратник. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 320 с.
- 23. Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов / Отв. ред. Н.Н. Мельников. Новосибирск: Изд-во СО РАН. т. 1. 2009. 304 с; т. 2. 2010. 261 с.
- 24. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Т. 1 / Под ред. Н.Н. Мельникова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 549 с.
- 25. Wang Kaixing, Dou Linming, Pan Yishan Study of tunnel roof anti impact and energy absorption effect on block overburden rock mass failure // J. of China University of Mining and Technology. 2017, Vol. 46, No. 6, pp. 1212—1217.
- 26. Zhou A. T., Wang K. Regularities of Two-Phase Gas Flow under Coal and Gas Outbursts in Mines // J. of Mining Science, 2017, Vol. 53, No. 3, pp. 533—543.
- 27. Zuzana Weishauptová, Oldřich Přibyl, Ivana Sýkorová, Vladimír Machovič Effect of bituminous coal properties on carbon dioxide and methane high pressure sorption // Fuel, 2015, 139, pp. 115—124.
- 28. Kiani A., Sakurovs R., Grigore M., Sokolova A. Gas sorption capacity, gas sorption rates and nanoporosity in coals // International Journal of Coal Geology, 2018, 200, pp. 77–86.
- 29. Shroder J.F., Davies T. Landslide Hazards, Risks, and Disasters. Amsterdam-Oxford-Waltham: Elsevier, 2015. 492 p.
- 30. *Hudyma M., Brown L., Cortolezzis D.* Seismic risk in Canadian mines. CIM MEMO, 2016, Sudbury, 14 p.
- 31. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why / In: Proc. 9th Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines RaSiM9, November 15—17, Santiago, Chile (J. A. Vallejos, ed.), S. A. Editec, Santiago, Chile, pp. 316 324.
- 32. Wang Kai-xing, Pan Yi-shan, Dou Lin-ming Energy transfer in block-rock mass during propagation of pendulum-type waves // Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(12), pp. 2309—2314.

REFERENCES

- 1. Oparin V. N., Adushkin V. V., Vostrikov V. I., Usol'tseva O.M., Mulev S. N., Yushkin V. F., Kiryaeva T. A., Potapov V. P. An experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part I: Research problem statement and justification. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(1):5-25. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25.
- 2. Adushkin V.V., Oparin V.N. From the Alternating-Sign Explosion Response of Rocks to the Pendulum Waves in Stressed Media. *J. of Mining Science*, P. I: 2012, Vol. 48, No. 2, pp. 203—222; P. II: 2013, Vol. 49, No. 2, pp. 175–209; P. III: 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 623–645; P. IV: 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 1–35.
- 3. Oparin V. N., Tapsiev A. P., Vostrikov V. I., et al., On Possible Causes of Increase in Seismic Activity of Mine Fields in the Oktyabrsky and Taimyrsky Mines of the Norilsk Deposit in 2003. Part I: Seismic Regime. *J. of Mining Science*, 2004, Vol. 40, No. 4, pp. 321–338.
- 4. Oparin V. N., Simonov B. F. Nonlinear deformation-wave processes in the vibrational oil geotechnologies. J. of Mining Science, 2010, Vol. 46, No. 2, pp. 95–112.
- 5. Oparin V. N., Adushkin V. V., Kiryaeva T. A., Potapov V. P. Tyukhrin V. G., Glumov A. V. Effect of Pendulum Waves from Earthquakes on Gas-Dynamic Behavior of Coal Seams in Kuzbass. *J. of Mining Science*, 2018, Vol. 40, No. 1, pp. 3—14.

- 6. Oparin V. N. Theoretical Fundamentals to Describe Interaction of Geomechanical and Physicochemical Processes in Coal Seams. *J. of Mining Science*, 2017, Vol. 53, No. 2, pp. 201–215.
- 7. Oparin V. N. Pendulum waves and «geomechanical temperature». *Trudy 2-oy Rossiysko-Kitayskoy mezhdunarodnoy konferentsii «Nelineynye geomekhaniko-geodinamicheskie protsessy pri otrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh na bol'shikh glubinakh»*. Novosibirsk: IGD SO RAN, 2012, pp. 169–172. [In Russ].
- 8. Rikitake T. *Predskazanie zemletryaseniy* [Earthquake forecast], Moscow, Mir, 1979, 388 p.
- 9. Aki K., Richards P. *Kolichestvennaya seysmologiya. Teoriya i metody.* T. 1 [Quantitative seismology. Theory and methods. Vol. 1], Moscow, Mir, 1983, 519 p.
- 10. Sobolev G.A. Osnovy prognoza zemletryaseniy [Foundations of earthquake forecast], Moscow, Nauka, 1993, 314 p.
- 11. Oparin V. N., Simonov B. F., Yushkin V. F., Vostrikov V. I., Pogarskiy Yu. V., Nazarov L. A. Geomekhanicheskie i tekhnicheskie osnovy uvelicheniya nefteotdachi plastov v vibrovolnovykh tekhnologiyakh [Geomechanical and technical foundations for enhanced oil recovery in vibro-wave technologies], Novosibirsk, Nauka, 2010, 404 p.
- 12. Wang K., Oparin V.N. Study on recognition of pendulum-type wave propogation in block rock mass. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. 2018, Vol. 21, Jssue 2, pp. 95—110.
- 13. Sadovskiy M.A., Kedrov O. K., Pasechnik I. P. Seismic energy and volume of sources of the crust earthquakes and underground explosions. *Doklady Akademii nauk*. 1985. vol. 283, no 5, pp. 1153—1156. [In Russ].
- 14. Gurvich I.I., Boganik G.N. Seysmicheskaya razvedka [Seismic exploration], Moscow, Nedra, 1980, 551 p.
- 15. Oparin V. N., Timonin V. V., Karpov V. N., Smolyanitskiy B. N. Application of energy volumetric rock destruction criterion to improvement of rotary–percussion drilling technology. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2017, no 6, pp. 81–104. [In Russ].
- 16. Oparin V. N., Usol'tseva O. M., Semenov V. N., Tsoi P. A. Evolution of stress—strain state in structured rock specimens under uniaxial loading. *J. of Mining Science*, 2013, Vol. 49, No. 5, pp. 865—877.
- 17. Oparin V. N., Kiryaeva T. A., Usol'tseva O. M. Nonlinear deformation-wave processes in various rank coal specimens loaded to failure under varied temperature. *J. of Mining Science*, 2015, Vol. 51, No 4, pp. 641–658.
- 18. Oparin V. N., Tanayno A. S. *Kanonicheskaya shkala ierarkhicheskikh predstavleniy v gornom porodovedenii* [Canonical scale of hierarchical representation in the rock science], Novosibirsk, Nauka, 2011, 259 p.
- 19. Zhurkov S. N. Kinetic concept of strength of solids (thermofluctuation mechanism). Vestnik Akademii nauk SSSR. 1968, no 3, pp. 46–52. [In Russ].
- 20. Zhurkov S.N., Kuksenko V.S., Petrov V.A. Predicting rock fracture. Fizika Zemli. 1977, no 6, pp. 11–18. [In Russ].
- 21. Sadovskiy M.A., Adushkin V.V., Spivak A.A. Sizes of irreversible deformation zones under blasting in blocky medium. *Izbrannye trudy* [Selected works], Moscow, Nauka, 2004, pp. 109–115.
- 22. Oparin V. N., Annin B. D., Chuguy Yu. V. Metody i izmeritel'nye pribory dlya modelirovaniya i naturnykh issledovaniy nelineynykh deformatsionno-volnovykh protsessov v blochnykh massivakh gornykh porod. Red. V.L. Shkuratnik [Methods and instrumentation for modeling and full-scale investigation of nonlinear deformation–wave processes in blocky rock masses. Shkuratnik V. L. (Ed.)], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2007, 320 p.
- 23. Oparin V.N., Bagaev S.N., Malovichko A.A. *Metody i sistemy seysmodeformatsionnogo monitoringa tekhnogennykh zemletryaseniy i gornykh udarov*. Red. N.N. Mel'nikov [Methods and systems of seismic deformation monitoring of induced earthquakes and rock bursts. Mel'nikov N.N. (Ed.)], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN. vol. 1. 2009, 304 p. vol. 2. 2010, 261 p.
- 24. Geomekhanicheskie polya i protsessy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya ochagovykh zon katastroficheskikh sobytiy v gornotekhnicheskikh i prirodnykh sistemakh. T. 1. Red. N.N. Mel'nikov [Geomechanical fields and processes: experimental and analytical research into initiation and growth focal zones of catastrophes in mine-technical and natural systems. Vol. 1. Mel'nikov N.N. (Ed.)], Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2018, 549 p.

- 25. Wang Kaixing, Dou Linming, Pan Yishan Study of tunnel roof anti impact and energy absorption effect on block overburden rock mass failure. *J. of China University of Mining and Technology*. 2017, Vol. 46, No. 6, pp. 1212–1217.
- 26. Zhou A. T., Wang K. Regularities of Two-Phase Gas Flow under Coal and Gas Outbursts in Mines. *J. of Mining Science*, 2017, Vol. 53, No. 3, pp. 533–543.
- 27. Zuzana Weishauptová, Oldřich Přibyl, Ivana Sýkorová, Vladimír Machovič Effect of bituminous coal properties on carbon dioxide and methane high pressure sorption. *Fuel*, 2015, 139, pp. 115–124.
- 28. Kiani A., Sakurovs R., Grigore M., Sokolova A. Gas sorption capacity, gas sorption rates and nanoporosity in coals. *International Journal of Coal Geology*, 2018, 200, pp. 77–86.
- 29. Shroder J.F., Davies T. Landslide Hazards, Risks, and Disasters. Amsterdam-Oxford-Waltham: Elsevier, 2015. 492 p.
- 30. Hudyma M., Brown L., Cortolezzis D. Seismic risk in Canadian mines. CIM MEMO, 2016, Sudbury, 14 p.
- 31. Lasocki S., Orlecka-Sikora B., Mutke G., Pytel W., Rudzinski L. A catastrophic event in Rudna copper-ore mine in Poland on 29 November, 2016: what, how and why. In: *Proc. 9th Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines RaSiM9*, November 15—17, Santiago, Chile (J. A. Vallejos, ed.), S. A. Editec, Santiago, Chile, pp. 316 324.
- 32. Wang Kai-xing, Pan Yi-shan, Dou Lin-ming Energy transfer in block-rock mass during propagation of pendulum-type waves. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(12), pp. 2309–2314. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Опарин Виктор Николаевич¹ — член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий отделом, e-mail: oparin@misd.ru, Адушкин Виталий Васильевич¹ — академик РАН, советник РАН, д-р физ.-мат. наук, e-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru, Институт динамики геосфер РАН, Востриков Владимир Иванович¹ — канд. техн. наук, зав. лабораторией, e-mail: vvi49@mail.ru, Юшкин Владимир Федорович¹ — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: L14@ngs.ru, Киряева Татьяна Анатольевна¹ — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: coalmetan@mail.ru, ¹ Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН. Для контактов: Опарин В.Н., e-mail: oparin@misd.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Oparin¹, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Professor, Head of Department, e-mail: oparin@misd.ru, V.V. Adushkin¹, Academician of Russian Academy of Sciences, Advisor of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys. Mathem.), Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, 119334, Moscow, Russia, e-mail: adushkin@idg.chph.ras.ru, V.I. Vostrikov¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, e-mail: vvi49@mail.ru, V.F. Yushkin¹, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, e-mail: L14@ngs.ru, T.A. Kiryaeva¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: coalmetan@mail.ru, ¹ Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia. Corresponding author: V.N. Oparin, e-mail: oparin@misd.ru.