

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 550.3 + 551 + 622

О ВЛИЯНИИ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ УГОЛЬНЫХ ШАХТ КУЗБАССА

**В. Н. Опарин¹, В. В. Адушкин^{1,2}, Т. А. Киряева¹,
В. П. Потапов^{1,3}, А. А. Черепов⁴, В. Г. Тюхрин⁴, А. В. Глумов⁵**

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: oparin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Институт динамики геосфер РАН, Ленинский проспект, 38, 119334, г. Москва, Россия

³Институт вычислительных технологий СО РАН (Кемеровский филиал),

ул. Рукавишниковая, 21, 650025, г. Кемерово, Россия

⁴АО "Распадская угольная компания", E-mail: Andrey.Cherepov@evraz.com,
Vadim.Tyukhrin@evraz.com, просп. Курако, 33, 654006, г. Новокузнецк, Россия

⁵ООО "Шахта "Алардинская", E-mail: Anton.Glumov@evraz.com,
ул. Угольная, 56, 652831, п. Малиновка, Кемеровская обл., Россия

На основе теории взаимодействия между нелинейными геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах при их отработке и открытого поршневого механизма возникновения газодинамических процессов экспериментально доказано влияние нелинейных упругих волн маятникового типа квазиметрового скоростного диапазона от природно-техногенных землетрясений на газодинамическую активность шахт Кузбасса. В качестве объектов исследований для установления соответствующих взаимосвязей рассматривались крупные землетрясения, произошедшие в Кузбассе 9 ноября 2016 г. (магнитуды 2.7 и 3.7), а также записи по индуцированной ими газодинамической активности на шахтах "Алардинская" и "Осинниковская".

Волны маятникового типа, квазиметровый скоростной диапазон, землетрясения, поршневой механизм, газодинамическая активность, Кузбасс, угольный разрез Калтанский, шахты "Алардинская", "Осинниковская"

DOI: 10.15372/FTPRPI20180101

Экспертно-аналитический обзор важнейших результатов экспериментально-теоретических исследований по развитию основ нелинейной геомеханики и геофизики за период времени почти 50 лет (с конца 60-х годов XX в.) представлен в [1]. Его начальный этап ознаменовался фундаментальными работами академика М. А. Садовского и его учеников, обративших особое внимание на блочно-иерархическое строение массивов горных пород и геоматериалов [2 – 5].

Роль отмеченного М. А. Садовским структурного фактора оказалась определяющей в понимании обнаруженного в экспериментах многообразия геомеханико-геофизических процессов, индуцируемых разными источниками в породных массивах, но не находивших объяснения в доминирующих на тот период представлениях в рамках континуальных моделей механики сплошных сред. В частности, к их числу следует отнести открытие явления знакопеременной реакции горных пород на взрывные (динамические) воздействия [6, 7], а затем и нелинейных упругих волн маятникового типа [8–10]. Большая роль в открытии последних принадлежит исследованиям и разработкам по созданию нового вида измерительных лазерных систем по детальному сейсмодеформационному контролю движения структурных элементов в породном массиве по скважинам и штольням специального назначения [11–14].

В последнее десятилетие получены важные экспериментально-теоретические результаты [1, 15–21], связанные с описанием динамико-кинематических характеристик 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.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТНОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ИНДУЦИРУЮЩИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Научные основы применяемой в настоящей работе методологии и метода определения динамико-кинематических характеристик нелинейных упругих волн маятникового типа изложены в [1, 8–12] на примере рудных и нефтегазовых месторождений полезных ископаемых. Отметим ключевые моменты, необходимые для понимания экспериментального материала, относящегося к угольным месторождениям, когда источником возникновения маятниковых волн становятся очаги природно-техногенных землетрясений (в том числе 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. К таким ключевым моментам относятся следующие.

Во-первых, это кинематическое выражение для волн маятникового типа [1, 9]:

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

где \mathcal{G}_v — скорость распространения маятниковых волн (μ -волны); \mathcal{G}_p — скорость распространения продольных волн в геоблоках-носителях μ -волны; \mathcal{G}_ε — средняя скорость (по модулю) трансляционного движения соударяющихся геоблоков диаметром Δ ; $\nu[\sigma]$ — структурный параметр геосреды, зависящий от напряженного состояния σ , который можно аппроксимировать зависимостью параболического вида на допредельной стадии деформирования горных пород:

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

здесь ν_0 — минимальное значение параметра $\nu_\Delta(\delta)$ при действующем в заданном объеме горных пород виде напряженно-деформированного состояния, определяемого по формулам:

$$v_{\Delta}(\delta) \in (10^{-2} - 10^{-1})\mu_{\Delta}(\delta), \quad (3)$$

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \frac{\delta_i}{\Delta_i} \in [0.5 - 2] \cdot 10^{-2} \quad \forall i. \quad (4)$$

Геомеханический инвариант $\mu_{\Delta}(\delta)$ в (3), (4) характеризует статистически инвариантный диапазон отношений между средними значениями раскрытия трещин δ_i к диаметрам Δ_i отделяемых ими структурных элементов (блоков) горных пород различного масштабного (иерархического) уровня i . Для реальных массивов горных пород параметр $v_{\Delta}(\delta)$ из (3) можно оценивать в виде

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

Во-вторых, это энергетическое условие возникновения и распространения волн маятникового типа в напряженных геосредах блочно-иерархического строения [1, 9]:

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

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

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

Как показано в [1, 9], соотношения (6) и (7) 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.

На внешней поверхности очаговой зоны таких динамических событий скоростная характеристика \mathcal{G}_ε в (1) становится непосредственно зависящей от энергетической характеристики W из (7). Так, в [9] 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 $3 \cdot 10^3 \leq \mathcal{G}_p \leq 6 \cdot 10^3$ м/с значения \mathcal{G}_ε в (1) можно оценить диапазоном $\mathcal{G}_\varepsilon \in 2.52 - 10$ м/с.

В-третьих, это доказательство в [17] существования операторного продолжения $\Omega\{\dots\}$, связывающего между собой уравнения Ленгмюра (изотермы адсорбции) и Опарина (кинематическое выражение для маятниковых волн (1)):

$$\Omega\{\dots\} \equiv \left\{ \begin{array}{l} A \rightarrow \mathcal{G}_v \\ p \rightarrow \mathcal{G}_\varepsilon \\ k \rightarrow \frac{1}{v[\sigma]\mathcal{G}_p} \\ A_* \rightarrow \mathcal{G}_p(v[\sigma]+1) \end{array} \right\} \quad (8)$$

(в [17] в (13) допущена опечатка: вместо $A \rightarrow \mathcal{G}_p$ следует читать $A \rightarrow \mathcal{G}_v$),

$$A = A_* \frac{k p}{1 + k p}. \quad (9)$$

Здесь A — абсорбционный аналог изотермы мономолекулярной абсорбции (газов/жидкости); A_* — предельное значение A (максимальная абсорбция при заполнении абсорбентом пор и трещин в заданном геомеханическом состоянии пород или геоматериала); k — 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 (8) и (9), с учетом (1)–(4), свидетельствуют о существовании непосредственной связи между нелинейными деформационно-волновыми и массо-газообменными (в том числе и физико-химическими!) процессами в многофазных напряженных геосредах блочно-иерархического строения, осуществляемой через поршневой механизм знакопеременного движения геоблоков-носителей пакетов маятниковых волн. Иными словами, наблюдается модуляция массо-газообменных процессов в массивах горных пород деформационно-волновыми за счет осциллирующего движения их структурных элементов [1].

В данной работе основное внимание уделяется низкоскоростным группам волн маятникового типа, так называемого квазиметрового диапазона [9, 12]. Так, группа волн маятникового типа, индуцируемая крупными землетрясениями 2008 г. с эпицентрами, расположенными в акватории оз. Байкал, энергетических классов $K \in 9.6–15.2$ с удалениями $R \in 16–30$ км от места их регистрации лазерным деформометром конструкции Института лазерной физики СО РАН (сейсмостанция “Талая”), оценена инструментально диапазоном $\mathcal{V}_v \in 0.43–1.76$ м/с.

Особо отметим также, что в [9] порядково близкий диапазон для скоростей волн маятникового типа (в зависимости от вида их источников, размера структурных элементов — носителей маятниковых волн, типа горных пород и их напряженного состояния) выделен по последствию мощных виброисточников с поверхности Земли на эффект изменения дебета нефти и газа продуктивных пластов на глубинах около 1.5 км ($\mathcal{V}_v \in 1.9–2.1$ м/с). В [11] измерениями оптоэлектронным комплексом МОЭД-1п нелинейных деформационно-волновых процессов от технологических взрывов (каждый с расходом ВВ 200–300 кг) на удалениях 70–110 м от забоев проходимых выработок до мест их регистрации (рудник “Октябрьский”, г. Норильск) скоростной диапазон маятниковых волн оценивался как $\mathcal{V}_v \in 1.1–1.9$ м/с. В тех же условиях от слабого сейсмического толчка в непосредственной окрестности горной выработки скорость индуцированной им маятниковой волны имела диапазон 5–8 см/с (или 0.05–0.08 м/с).

Как следует из теории волн маятникового типа [1, 9, 18–21], в соответствии с (1) их динамико-кинематические характеристики обладают весьма широким диапазоном изменений в зависимости от линейных размеров и физико-механических свойств структурных отдельных (блоков) — вещественных носителей упругой энергии в породных массивах, действующего вида напряженно-деформированного состояния, размера и силовых характеристик источников возбуждения. В [9, 15] особо выделены низкоскоростные их группы: в диапазонах от $10^{-6}–10^{-5}$ м/с (в среднем $0.93 \cdot 10^{-5}$) до 3.3–6.1 м/с, экспериментально замеренных на шахтах и рудниках. Теоретически наибольшие значения маятниковые волны могут достигать скоростей продольных и поперечных сейсмических волн [1]. Это создает определенные методические трудности в их разделении в ближней, переходной и дальней зонах влияния источников излучения, особенно по сейсмическим записям [1, 11, 12].

Основным мотивом для проведения настоящих исследований послужили публикации [16, 17], посвященные открытию поршневого механизма возникновения массо-газообменных процессов в угольных пластах различной стадии метаморфизма и его количественному описанию в рамках теории волн маятникового типа. При этом следует отметить: если собственно эффект (поршневой механизм) был обнаружен в лабораторных испытаниях угольных образцов разного марочного состава [16], то теоретические основы для его описания имеют общий для породных массивов характер [17]. Следовательно, существуют основания для проверки возможности возникновения (и проявления) поршневого механизма газообменных процессов в масштабе угольных шахт с приходом маятниковых волн от достаточно сильных по магнитуде землетрясений.

Кузбасс относится к сейсмоактивному региону, где за последние 200 лет произошло около двадцати крупных землетрясений с магнитудой 3.6–6.5 [22]. С меньшей магнитудой ежегодно фиксируются сотни землетрясений, большая часть которых представляет собой сейсмические события низкой энергии с неглубокими гипоцентрами. Значительный рост количества сейсмических явлений отмечается в последние десятилетия [1]. При этом активизация сейсмических событий наблюдается в зонах, где ранее происходили достаточно крупные землетрясения, а в настоящее время активно ведутся горные работы в условиях высокой тектонической и неотектонической нарушенности недр [22].

На территории Кузбасса, занимающей 27 тыс. км², разработку твердых полезных ископаемых подземным и открытым способом осуществляют более 300 горнодобывающих предприятий. К настоящему времени из недр уже извлечено около 10 млрд т полезных ископаемых, а глубина ведения горных работ достигла 1 км [22]. Из-за масштабного техногенного воздействия горно-промышленных объектов Кузбасса на его недра, в том числе и применения технологических взрывов большой мощности [1], произошла заметная активизация горных ударов, толчков, внезапных выбросов угля и газа, оползневых явлений, индуцированной сейсмичности.

Как известно, недра Южного Кузбасса характеризуются весьма высокой тектонической нарушенностью [22]. Здесь имеются многочисленные системы крупных и малоамплитудных разрывных нарушений различной ориентации. С ростом масштабов горного производства заметно проявила себя неотектоническая активность недр этого региона: начались геодинамические подвижки вдоль отдельных разломов. В зонах их влияния возникли специфические формы динамических проявлений горного давления в подземных выработках — сначала на рудниках Горной Шории, а затем и на глубоких угольных шахтах Междуреченского, Прокопьевско-Киселевского и Анжерского районов Кузбасса. С ведением горных работ на глубинах более 250–350 м на отдельных участках шахт и рудников вблизи геодинамически активных зон (локализации деформаций) стали проявляться горные удары и внезапные выбросы угля и газа.

Существуют разные представления о возможном влиянии природных землетрясений на наведенную сейсмичность в пределах зон влияния рудников и шахт в процессах их отработки. Знать реальный механизм такого влияния особенно важно для условий освоения месторождений полезных ископаемых в газодинамически (и сейсмически) активных регионах России — вплоть до горно-тектонических ударов особой разрушительной силы [1]. По энергетическим условиям их возникновения выделяется обширный класс индуцированных сейсмособытий, относимых к триггерной сейсмичности, в том числе и применительно к Кузбассу [23].

Для более общего случая — индуцированной сейсмичности — в [1] дано понятие сейсмособытий интерференционного вида с безразмерным энергетическим условием (6), (7) их возникновения. Энергетическая добавка от удаленных природных землетрясений не обязательно мала по сравнению с энергонасыщенностью породных массивов на обрабатываемых горизонтах. Одним из важнейших следствий введенного в [1, 9] безразмерного энергетического условия (отсутству-

ет влияние удаленных землетрясений) является возникновение очаговых зон повышенной концентрации напряжений в пределах шахтных полей, релаксирующих в режиме пульсирующей сейсмичности [15] — своеобразных геомеханических пульсаров. Сейсмоэмиссионный процесс здесь приобретает детерминированный характер, который ему придают: физическая связь низкочастотного движения пакетов волн маятникового типа с конкретными по размерам вещественными носителями (работающими блоками) и привязка отдельных регистрируемых сейсмособытий к динамическим подвижкам структурных блоков, включенных в нелинейный деформационно-волновой процесс в формирующейся очаговой зоне [15].

Учитывая, что поршневого механизм возникновения массо-газообменных процессов в угольных образцах обусловлен осциллирующим движением структурных элементов (берегов разделяющих их трещин) в результате трансформации накопленной упругой энергии в кинетическую [16, 17], естественной представляется идея проверки наличия этого эффекта в натуральных условиях угольных шахт Кузбасса. Последние могут рассматриваться как большие угольные образцы для угольного бассейна, но перфорированные системой выработок, с набором датчиков метановыделения, по которым можно контролировать как техногенную фоновую составляющую, так и индуцированную землетрясениями. Поскольку в основе поршневого механизма лежат нелинейные деформационно-волновые процессы, в установлении причинно-следственной связи между изучаемыми процессами (землетрясение — процесс газовыделения) фундаментальная роль принадлежит динамико-кинематическим характеристикам маятниковых волн, распространяющихся от их источника до объектов геомеханического влияния, находящихся друг от друга на определенных расстояниях (угольные шахты).

В основу настоящей работы положен методический подход [9–12] по определению скоростных характеристик медленных маятниковых волн, индуцируемых мощными вибрационными установками на поверхности Земли и от крупных землетрясений в акватории оз. Байкал. В отмеченных работах реализован, на первый взгляд, достаточно простой метод определения скоростных характеристик медленной группы волн \mathcal{G}_v маятникового типа: по отношению расстояния $\Delta R_{и,п}$ между источником геомеханического события (мощной виброустановки [9] или очага землетрясения [12]) и приемником (в месте влияния источника) ко времени задержки $\Delta T_{и,п}$ начала контролируемого процесса в приемнике (нефтегазовый пласт [9], станция лазерных наблюдений за землетрясениями [12]):

$$\mathcal{G}_v = \frac{\Delta R_{и,п}}{\Delta T_{и,п}}, \quad (10)$$

где и — источник; п — приемник.

В качестве приемника можно рассматривать как обрабатываемые горизонты с угольными пластами, так и угольные шахты в целом, а в качестве источников — землетрясения или массовые взрывы, например на угольных разрезах Кузбасса. В приемнике могут регистрироваться разной природы физические поля — не обязательно деформационно-волновые или сейсмические, однако обладающие наличием детерминированной связи между деформационно-волновыми процессами и контролируемыми в шахтных условиях физико-механическими и/или газодинамическими характеристиками соответствующими измерительными датчиками. Открытие поршневого механизма массо-газообменных процессов в геоматериалах при определенных условиях их нагружения [16, 17] и обеспечивает подобную детерминированную связь.

При землетрясениях координатно-временная и энергетическая спецификация источников излучения сейсмических волн продольного и поперечного типов осуществляется сетью сейсмологических станций известными методами [24–26], а определение времени вступления индуцируемых землетрясениями взрывами и другими механическими источниками низкочастот-

ростных групп волн маятникового типа в местах расположения их приемников — задача не тривиальная [1, 8, 9], поскольку при регистрации физической информации возникает ряд трудностей, обусловленных спецификой функционирования горнодобывающих предприятий, используемыми системами геомеханического и газодинамического контроля.

При регистрации нелинейных деформационно-волновых процессов (например, по параметрам газовыделения угольных пластов в горные выработки) существенное значение приобретает их фоновая составляющая. Наличие детерминированной связи между какими-либо разнородными по своим физико-механическим или физико-химическим проявлениям геодинамическими событиями требует экспериментального доказательства с учетом конкретных условий реализации таких событий.

ОЦЕНКА СКОРОСТНОГО ДИАПАЗОНА МАЯТНИКОВЫХ ВОЛН ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЗАПИСЯМ МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ КУЗБАССА

В отличие от большинства рудных месторождений, при отработке угольных месторождений подземным способом работающие шахты оснащены системами автоматического газового контроля (АГК). От качества их функционирования во многом зависят безопасные условия ведения горных работ, обеспечиваемые соответствующими режимами работы вентиляционной сети и ее типологией. В этой связи следует отметить, что до последнего времени большие потоки информации, регистрируемой АГК, практически не использовались для решения комплексных задач в геомеханико-геодинамических исследованиях. В первую очередь — с позиций установления детерминированных связей между землетрясениями, мощными технологическими взрывами на карьерах и газодинамической активностью на угольных шахтах. Это особенно важно для регионов с тектонически активным обрамлением, каким является Алтае-Саянская складчатая область для Кузнецкого угольного бассейна.

В настоящей работе осуществлена первая попытка установить наличие подобной связи на примере землетрясений, произошедших в 2016 г. В соответствии с методологическими и методическими аспектами предполагается возможная ключевая роль нелинейных упругих волн маятникового типа от землетрясений, которые посредством поршневого механизма способны индуцировать массо-газообменные процессы во вмещающих породных массивах и повышенную газообильность в подземных выработках. Конечно, интенсивность газодинамических процессов и их длительность должны при этом зависеть от динамико-кинематических характеристик маятниковых волн.

Согласно [1, 9, 10], такие характеристики, в отличие от линейных упругих волн, непосредственно зависят от вида напряженно-деформированного состояния, блочно-иерархического строения геосреды и энергетических параметров источников излучения маятниковых волн. Принципиально значимой является задача феноменологической оценки скоростных характеристик работающих групп, ответственных за индуцируемые ими газодинамические процессы на угольных шахтах от землетрясений за счет реализации поршневого механизма.

Ниже приведено решение этой задачи применительно к двум крупным землетрясениям в Кузбассе с привлечением экспериментальных данных о их последствиях на газодинамическую активность, зарегистрированную действующими системами АГК на угольных шахтах “Алардинская” и “Осинниковская”.

Опираясь на изложенные методолого-методические положения, формально решалась следующая задача с использованием выражения для \mathcal{Q}_v (10): в какой диапазон значений попадают времена задержки $\Delta T_{и,п}$ начала аномально высоких значений (по сравнению с фоновыми) метано-газовых выделений на заданных расстояниях $\Delta R_{и,п}$ контролируемых участков шахт от очагов землетрясений с известными моментами времени начала этих сейсмособытий.

Надо сказать, что параметр $\Delta T_{и,п}$ очень важен с позиций заблаговременного предупреждения руководства угольных шахт по принятию профилактических и экстренных мер реагирования на сейсмические события с высокими энергетическими показателями.

О влиянии землетрясений 2016 г. ($ML = 3.0$, 02:37; $ML = 4.1$, 04:38) на газодинамическую активность угольных шахт Кузбасса (“Алардинская”, “Осинниковская”).

Как отмечено в [25], система мониторинга наведенной сейсмичности Кузбасса (АСФ ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН”) в последнем квартале 2016 г. начала фиксировать нарастающую сейсмоактивность в районе Калтанского угольного разреза; определенная серия сейсмособытий оказалась ощутимой для населения Кузбасса и гражданских строений. При этом по геофизическим данным наиболее сильные землетрясения происходили за пределами угольного разреза — на границе отвала. Внутри активированной зоны проявились низкомагнитудные землетрясения, приуроченные к подземным выработкам.

Рассмотрим газодинамические проявления в угольных шахтах “Алардинская” и “Осинниковская”, индуцированные двумя достаточно крупными по магнитуде землетрясениями, зарегистрированными 9 ноября 2016 г. К отмеченному периоду времени, в дополнение к существующей системе мониторинга сейсмособытий, была развернута временная сеть сейсмостанций, позволившая существенно повысить полноту и координатную привязку регистрируемых динамических событий в районе ведения горных работ [25].

Первое землетрясение было зарегистрировано в 22:37 мск (02:37 местн. времени) магнитудой 3.0 близ Калтанского городского округа, второе в 00:38 мск (04:38 местн. времени) магнитудой 4.1, его эпицентр находился примерно в том же районе. Оба — на глубине около 2 км.

Энергетические характеристики сейсмособытий в [26] представлены в единицах локальной магнитуды ML , находящейся в определенных связях с объемной магнитудой M_s и выделившейся сейсмической энергией E_s (Дж) [27]:

$$M_s = 1.27(ML - 1) - 0.016ML^2, \quad (11)$$

$$\log E_s = 4.4 + 1.5[1.27(ML - 1) - 0.016ML^2]. \quad (12)$$

По данным руководства угольной компании “Южкузбассуголь”, производственных взрывов во время этих землетрясений на шахтах “Алардинская” и “Осинниковская” не проводилось. Также 9 ноября и в последующие дни не осуществлялось остановок шахтных вентиляторов, что могло бы привести к повышению концентрации метана в угольных шахтах. Тем не менее датчики метана в шахтах зафиксировали всплески концентрации метана (рис. 1, 2). На графиках вертикальной линией показано время первого землетрясения, а звездочками — время начала и окончания повышенного газовыделения в угольных шахтах.

Скорости маятниковых волн находились по формуле (10) с учетом детальных расчетов расстояний ΔR между очагами контрольных (1 и 2) землетрясений и соответствующими измерительными датчиками концентрации метана (по данным маркшейдеров шахты “Алардинская” — с точностью до 1 м), временам запаздывания между началами сейсмособытий и аномально высокого (по сравнению с фоновым) метановыделения пород в местах расположения измерительных датчиков ΔT в пределах угольной шахты. В указанном случае скоростной диапазон маятниковых волн оценивался как $\mathcal{V}_v \in 0.11 - 0.54$ м/с (таблица).

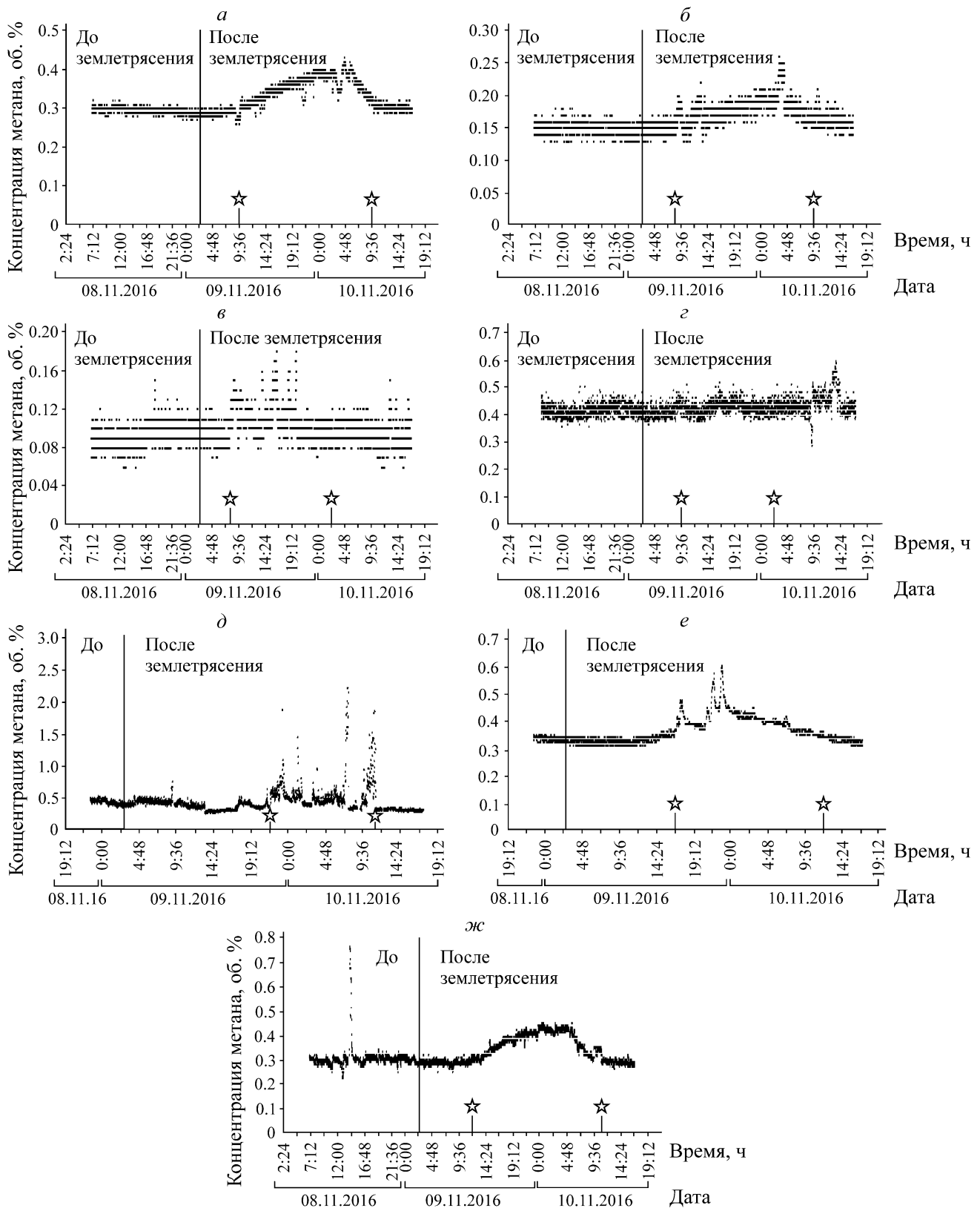


Рис. 1. Метановыделение по датчикам метана на шахте “Алардинская”: *а* — демонтажная камера 6-1-11, куток; *б* — демонтажная камера 6-1-11, исходящий поток; *в* — конвейерный штрек 6-1-20, забой; *г* — конвейерный штрек 6-1-20, исходящий поток; *д* — фланговый конвейерный бремсберг, пласт 6 (со сбойкой 3 фланг), забой; *е* — фланговый конвейерный бремсберг, пласт 6 (со сбойкой 3 фланг), исходящий поток; *жз* — фланговый конвейерный бремсберг, пласт 6, исходящий поток

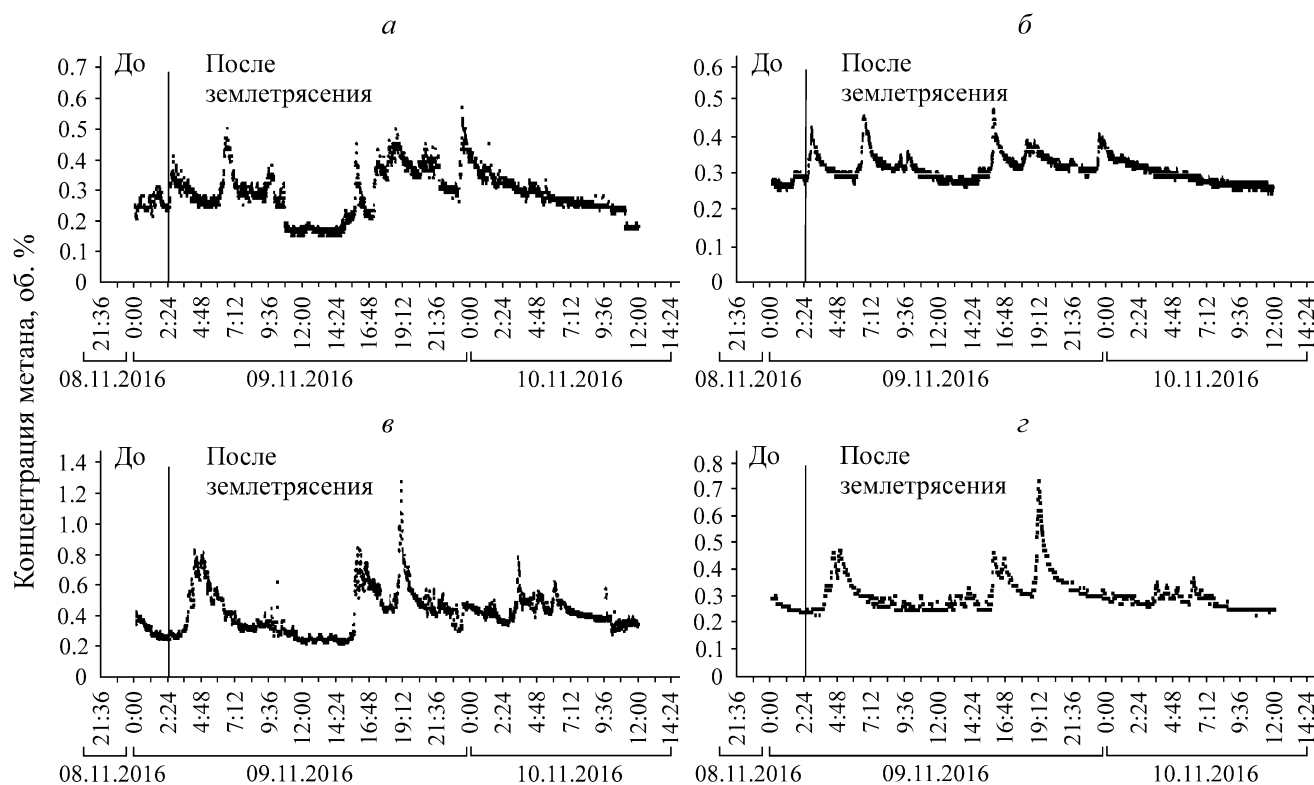


Рис. 2. Метановыделение по датчикам метана на шахте “Осинниковская”: *а* — бремсберг 283 путевой, забой; *б* — бремсберг 283 путевой, исходящий; *в* — бремсберг 283 людской, забой; *г* — бремсберг 283 людской, исходящий

Примеры данных расчета скоростей маятниковых волн в пределах шахты “Алардинская”

Номер датчика	Месторасположение датчика	ΔR , м	ΔT_1 , с	$\mathcal{V}_{v(1)}$, м/с	ΔT_2 , с	$\mathcal{V}_{v(2)}$, м/с	Длительность загазования
M101-062	Фланговый конвейерный бремсберг, пласт 6 (со сбойкой 3 фланг), забой	8 159	68 400	0.12	75 600	0.11	14 ч
M105-062	Фланговый конвейерный бремсберг, пласт 6 (со сбойкой 3 фланг), исходящий поток	8 159	50 400	0.16	57 600	0.14	19 ч 12 мин
M105-015	Фланговый конвейерный бремсберг, пласт 6, исходящий поток	8 020	33 780	0.24	40 980	0.20	23 ч
M245-008	Демонтажная камера 6-1-11, исходящий поток	10 925	21 600	0.51	28 800	0.38	25 ч
M243-008	Демонтажная камера 6-1-11, куток	10 925	25 200	0.43	32 400	0.34	24 ч
M101-053	Конвейерный штрек 6-1-20, забой	7 807	21 600	0.36	14 400	0.54	17 ч 43 мин
M105-053	Конвейерный штрек 6-1-20, исходящий поток	7 807	25 200	0.31	32 400	0.24	17 ч 43 мин

Примечание. ΔR — расстояние от землетрясения до измерительного датчика; ΔT_1 , ΔT_2 — время вступления маятниковых волн от 1-го и 2-го землетрясений; $\mathcal{V}_{v(1)}$, $\mathcal{V}_{v(2)}$ — скорость маятниковых волн для землетрясений 1 и 2

Примечательно, что диапазон скоростей 3.3–6.1 м/с в [28] описан на примере испытания силикатных моделей при инструментальном определении скоростей движения фронта опорного давления вглубь массива в результате практически мгновенного образования подземной полости в условиях действия напряжений, превышающих в 1.75 и 3 раза предел прочности пород на одноосное сжатие. Здесь очевидна прямая зависимость между уровнем напряжений и скоростной характеристикой волны опорного давления, относимой в [9], как частный случай, к волнам маятникового типа, описываемым соответствующим для них кинематическим выражением (1).

ВЫВОДЫ

Выполненные экспериментально-теоретические исследования позволили установить, что существует детерминированная связь между нелинейными деформационно-волновыми процессами, индуцируемыми природно-техногенными землетрясениями и распространяющимися в породных массивах в виде пакетов волн маятникового типа квазиметрового скоростного диапазона, и режимами повышенной газодинамической активности угольных шахт Кузбасса. В основу исследований положена теория взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в нефтегазонасыщенных и угольных пластах, а также экспериментально обнаруженный поршневой механизм возникновения нелинейных массо-газообменных процессов при испытаниях угольных образцов различного марочного состава.

Предложены методология и методика комплексного геомеханико-газодинамического мониторинга катастрофических событий, применение которых позволило экспериментально доказать, что возникающие от землетрясений низкоскоростные (квазиметрового диапазона) группы волн маятникового типа способны индуцировать повышенную циклическую газообильность в шахтах.

Дана иллюстрация этого научного положения на примере крупных землетрясений, произошедших в Кузбассе 9 ноября 2016 г. в районе Калтанского угольного разреза. Газодинамические последствия от землетрясений контролировались по записям датчиков концентрации метана на шахтах “Алардинская” и “Осинниковская”; магнитуды двух последних сейсмособытий по данным ГС РАН (АСФ СО РАН) составляли последовательно по времени 2.7 и 3.7 с эпицентрами близ Калтанского городского округа.

С учетом большого различия между скоростями распространения *P*- и *S*-волн, а также волн маятникового типа (более трех порядков), появляются качественно новые методолого-методические возможности для прогнозирования катастрофических событий на угольных шахтах Кузбасса, с осуществлением заблаговременного вывода горнорабочих из очистных забоев и предупредительных мер изменения режима функционирования горнодобывающих предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамическое воздействие — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. — Ч. I. — 2012. — № 2. — С. 3–27; Ч. II. — 2013. — № 2. — С. 3–46; Ч. III. — 2014. — № 4. — С. 10–38; Ч. IV. — 2016. — № 1. — С. 3–49.
2. Садовский М. А. О естественной кустоватости горных пород // ДАН. — 1979. — Т. 247. — № 4. — С. 829–831.
3. Садовский М. А. О распределении размеров твердых отдельностей // ДАН. — 1983. — Т. 269. — № 1. — С. 65–72.

4. Садовский М. А. Иерархия от пылинок до планет // Земля и Вселенная. — 1984. — № 6. — С. 5–9.
5. Садовский М. А., Кочарян Г. Г., Родионов В. Н. О механике блочного горного массива // ДАН. — 1988. — Т. 302. — № 2. — С. 306–307.
6. Курленя М. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Шемякин Е. И. О некоторых особенностях реакции горных пород на взрывные воздействия в ближней зоне // ДАН. — 1987. — Т. 293. — № 1. — С. 67–70.
7. Курленя М. В., Адушкин В. В., Гарнов В. В., Опарин В. Н., Ревуженко А. Ф., Спивак А. А. Знакопеременная реакция горных пород на динамическое воздействие // ДАН. — 1992. — Т. 323. — № 2. — С. 263–265.
8. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа // ФТПРПИ. — Ч. I. Состояние вопроса и измерительно-вычислительный комплекс. — 1996. — № 3. — С. 3–8; Ч. II. Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования. — 1996. — № 4. — С. 3–39; Ч. III. Данные натуральных наблюдений. — 1996. — № 5. — С. 3–27.
9. 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.
10. Шер Е. Н., Александрова Н. И., Айзенберг-Степаненко М. В., Черников А. Г. Влияние иерархической структуры блочных горных пород на особенности распространения сейсмических волн // ФТПРПИ. — 2007. — № 6. — С. 20–28.
11. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натуральных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 320 с.
12. Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др. Методы и системы сейсмо-деформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН. — Т. 1. — 2009. — 304 с.; Т. 2. — 2010. — 261 с.
13. Панов С. В., Парушкин М. Д., Семибаламут В. М., Фомин Ю. Н. Применение эмпирической модовой декомпозиции для наблюдения за деформационными процессами в штольнях и выработках // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 186–194.
14. Рассказов И. Ю., Долгих Г. И., Петров В. А., Луговой В. А., Долгих С. Г., Саксин Б. Г., Цой Д. И. Применение лазерного деформометра в системе комплексного геодинамического мониторинга в районе Стрельцовского рудного поля // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 29–37.
15. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И., Усольцева О. М., Аршавский В. В., Жилкина Н. Ф., Бабкин Е. А., Самородов Б. Н., Наговицын Ю. Н., Смолов К. В. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. // ФТПРПИ. — Ч. I. — 2004. — № 4. — С. 3–22; Ч. II. — 2004. — № 5. — С. 3–25; Ч. III. — 2004. — № 6. — С. 5–22; Ч. IV. — 2005. — № 1. — С. 3–8.
16. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Усольцева О. М., Цой П. А., Семенов В. Н. Об особенностях развития нелинейных деформационно-волновых процессов в угольных образцах различной стадии метаморфизма при нагружении до разрушения в изменяющемся поле температур // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 3–24.
17. Опарин В. Н. К теоретическим основам описания взаимодействия геомеханических и физико-химических процессов в угольных пластах // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 3–19.
18. Опарин В. Н., Тимонин В. В., Карпов В. Н. Количественная оценка эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 60–74.
19. Александрова Н. И., Черников А. Г., Шер Е. Н. О затухании маятниковых волн в блочном массиве горных пород // ФТПРПИ. — 2006. — № 5. — С. 67–74.

- 20. Александрова Н. И.** Лекции по теме “Маятниковые волны” в рамках курса “Нелинейная геомеханика”: учеб. пособие. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. — 72 с.
- 21. Александрова Н. И.** Нестационарные волновые процессы в блочных и упругих средах с учетом вязкости и внешнего сухого трения: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2015. — 42 с.
- 22. Лазаревич Т. И., Мазикин В. П., Малый И. А., Ковалев В. А., Поляков А. Н., Харкевич А. С., Шабаров А. Н.** Геодинамическое районирование южного Кузбасса. — Кемерово: Весть, 2006. — 181 с.
- 23. Адушкин В. В.** Триггерная сейсмичность Кузбасса // Триггерные эффекты в геосистемах. — 2015. — С. 8–28.
- 24.** [https://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясения в Кемеровской области](https://ru.wikipedia.org/wiki/Землетрясения_в_Кемеровской_области), 2013.
- 25. Еманов А. А., Еманов А. Ф., Фатеев А. В., Лескова Е. В.** Техногенная сейсмическая активизация на юге Кузбасса (п. Малиновка) // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017: “Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология”: сб. материалов. — Новосибирск: СГУГиГ, 2017. — Т. 3. — С. 66–71.
- 26. Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Цирель С. В.** Природно-техногенная сейсмичность Кузбасса // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 20–34.
- 27. Vormann P.** Magnitude of seismic events, New manuel of seismological observatory practice (NMSOP), Potsdam, Germany, Geo Forschungs Zentrum, 2009. — P. 3–16.
- 28. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Розенбаум М. А., Рева В. Н. и др.** Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 278 с.

Поступила в редакцию 29/XII 2017