

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 551 + 622

О КИНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗВИТИЯ СЕЙСМОЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА

В. Н. Опарин^{1,3}, А. Ф. Еманов², В. И. Востриков¹, Л. В. Цибизов³

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

² Геофизическая служба СО РАН (Алтае-Саянский филиал),
проспект академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия

³ Новосибирский государственный университет,
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Представлено экспериментальное доказательство эффективности применения ранее введенного В. Н. Опариным кинематического отношения (χ) “кажущихся” скоростей для сопряженных групп волн маятникового типа на основе формализованного (детерминированного) описания развития сейсмоэнерговыведения в пределах шахтных полей Норильского месторождения, но уже применительно к оценке изменения напряженно-деформированного состояния угольных пластов при их отработке на примере шахты “Полысаевская” (Кузбасс).

Развитие сейсмоэмиссионных процессов, кинематические характеристики, сопряженные группы волн маятникового типа, угольные пласты “Бреевский” и “Толмачевский”, Кузбасс, критерий удароопасности χ

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–4] для условий больших глубин Талнахско-Октябрьского месторождения полиметаллов установлен пульсирующий режим сейсмоэнерговыведения из напряженных участков шахтных полей. При этом движение фронтов индуцированной сейсмичности в пространстве вокруг очаговых зон повышенной концентрации напряжений имеет тип своеобразного сферического колеблющегося “маятника” со скоростями движения порядка $10^{-6} - 10^{-5}$ м/с в радиальных от центра сейсмоэнерговыведения направлениях и с “кажущимися” скоростями миграции смежных по времени проявления сейсмособытий порядка $10^{-2} - 10^{-1}$ м/с в пределах этих очаговых зон.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ОНЗ РАН (Проект 3.1), а также СО РАН (Партнерский интеграционный проект № 100).

Этот факт находит научное объяснение и количественное описание в рамках активно развиваемой ныне теории волн маятникового типа [5–9]. Согласно этой теории, развитие сейсмического процесса следует рассматривать как определенным образом детерминированный геомеханико-геодинамический процесс, а не как случайную цепь сейсмических событий. Исходя из этих соображений, в [10] предложен соответствующий метод сканирования шахтной сейсмологической информации для выделения медленных групп волн маятникового типа, а в [11] выведено кинематическое выражение практически для всех групп волн маятникового типа в напряженных массивах горных пород блочно-иерархического строения. Это позволило ввести в качестве диагностического параметра напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород кинематическое соотношение для сопряженных групп волн маятникового типа [1]

$$\chi(t) = \frac{V_E}{V_K}(t), \quad (1)$$

где V_E — среднемесячная скорость миграции приведенного центра сейсмоэнерговыведения; V_K — “кажущаяся” скорость миграции для упорядоченной по времени t проявления последовательности сейсмособытий контролируемого участка массива горных пород (очаговая зона).

Как показано в [1, 5, 6], это отношение характеризует (по порядку малости и зависимости от НДС пород) связь между реальным раскрытием трещин и диаметрами отделяемых ими структурных элементов породного массива — распределение, в статическом смысле инвариантное [12].

Поскольку носителями волн маятникового типа являются не абстрактные “элементарные объемы” [13], а конкретные по своим размерам структурные блоки массивов горных пород [11] (за счет их трансляционного и вращательного движения по механизму своеобразного “домино”), то имеется вполне реальная основа для введения нового понятия — “геомеханическая температура”. В отличие от кинетической теории газов, где температура определяется как величина, пропорциональная кинетической энергии движения атомов [14], здесь необходимо учитывать кинетическую энергию структурных элементов массивов горных пород, движущихся в стесненных условиях как абсолютно твердые тела. В этом смысле обратная величина (1), нормированная определенным образом, может служить “геомеханическим термометром” для формирующихся очаговых зон концентрации напряжений. Это направление теоретических исследований еще предстоит разрабатывать [15].

О КИНЕМАТИЧЕСКОМ КРИТЕРИИ УДАРООПАСНОСТИ И ЕГО АДАПТАЦИИ К УСЛОВИЯМ ОТРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА

Развиваемый в [1–4] метод контроля геомеханико-геодинамической обстановки и контроля сейсмоактивных зон горного массива основан на скоростных характеристиках “миграции” сейсмособытий, рассчитываемых для ограниченных зон повышенной сейсмоактивности. В качестве информативных характеристик здесь используются:

— “кажущаяся” скорость миграции отдельных сейсмособытий для упорядоченных по времени последовательностей их проявления;

— среднесуточная скорость миграции приведенного центра сейсмоэнерговыведения для контролируемых зон породного массива.

В расчете этих характеристик используется метод “кажущихся” скоростей, сущность которого состоит в следующем. Согласно [7], при поступательном и вращательном движении геоблоков вследствие локального перераспределения напряженного состояния возникают сейсмо-

эмиссионные (и электромагнитные эмиссионные) процессы, изменение пространственного положения которых показывает направление и скорость волны смещения или деформации. Считается, что значительные подвижки крупных геоблоков, которые регистрируются в виде “энергоемких” сейсмособытий, активируются движением вложенных в них более мелких блоков, регистрируемых в виде менее энергоемких сейсмособытий, упорядоченных по времени их проявления. Следовательно, из общей последовательности сейсмособытий можно выбирать подпоследовательности с ограничениями по энергетическому критерию: $E_i < E_0$, где E_0 — энергия “иницирующего” события, E_i — энергия i -го “иницируемого” события. Тогда “кажущейся” скоростью миграции i -го сейсмособытия можно назвать величину V_K , определяемую по формуле

$$V_K = \frac{\sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2}}{t_j - t_0}, \quad (2)$$

где x_j, y_j, z_j, t_j — координаты и время j -го сейсмособытия; x_0, y_0, z_0, t_0 — координаты и время крупного инициирующего сейсмособытия, которое повлекло за собой ряд более мелких по энергоемкости сейсмособытий.

Среднемесячную скорость миграции V_E приведенного центра сейсмособытий вычисляем по формуле

$$V_E = \frac{\sqrt{(x_{i-1} - x_i)^2 + (y_{i-1} - y_i)^2 + (z_{i-1} - z_i)^2}}{\Delta t}, \quad (3)$$

где i — номер периода; Δt — длина периода; x_i, y_i, z_i — координаты центра сейсмоэнерговыведения для i -го периода. Центр приведенного сейсмоэнерговыведения рассчитывается как средневзвешенный (весом в данном случае является энергия каждого события) геометрический центр сейсмособытий, зарегистрированных за период Δt_0 .

В качестве диагностического показателя НДС участков массивов горных пород с позиции их удароопасности в соответствии с [1] используем отношение (1).

Рассмотрим результаты использования данного подхода применительно к условиям отработки угольных месторождений Кузбасса на примере двух пластов шахты “Польсаевская”, где сложились для этого достаточные предпосылки.

Характеристика объекта исследования. На территории г. Польсаево Кемеровской области (Кузбасс) ведутся активные работы по добыче каменного угля подземным способом. Повышение сейсмической активности в районах разработки полезных ископаемых — явление нередкое [16, 17]. Кузнецкая котловина — район высокой техногенной нагрузки на земную кору. Добыча угля подземным и открытым способом в крупных масштабах, безусловно, сказывается на напряженном состоянии пород. Вместе с тем Кузбасс является сейсмическим районом, находящимся на сопряжении с тектонически активной Алтае-Саянской складчатой областью. Наведенная сейсмичность и горные удары появились в этом районе вместе с началом добычи твердых полезных ископаемых [18].

При исследовании сейсмических активизаций в районе г. Польсаево [19, 20] выделены три эпицентральных зоны, которые пространственно увязываются с лавами по добыче угля. Период инструментальных наблюдений (13.08.07 – 11.09.07) совпал с работой в двух горных выработках, расположенных на глубинах примерно 410 м (пласт “Бреевский”) и 440 м (пласт “Толмачевский”).

Горно-геологические условия в районе ведения горных работ. Вмещающими породами для каменного угля являются перемежающиеся слои песчаников, аргиллитов и алевролитов. Между горными выработками и дневной поверхностью находятся 4–5 отработанных угольных пластов. На рис. 1 приведены стратиграфическое строение породных толщ, вмещающих разрабатываемые пласты (согласно планам горных выработок шахты “Полысаевская”, ОАО “СУЭК-Кузбасс”), а также механические характеристики соответствующих пластов.

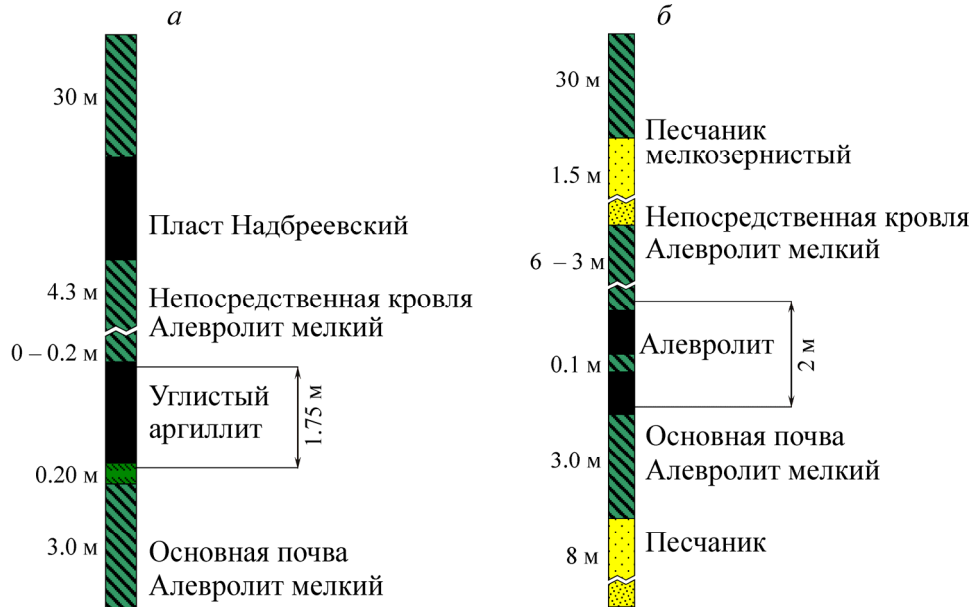


Рис. 1. Вмещающие породы Бреевского (а) и Толмачевского (б) пласта: коэффициент крепости по Протождяконову f изменяется в диапазоне 0.8–3.5 (а) и 1.5–6.0 (б)

Бреевский пласт: год начала разработки — 1974; пласт — опасный по газу метану, опасный по пыли, угрожаемый по горным ударам с глубины 150 м, угрожаемый по внезапным выбросам угля и газа с глубины 560 м, не склонен к самовозгоранию; марка угля — Г; приток воды — 51 м³/ч.

Толмачевский пласт: год начала разработки — 1979; пласт — опасный по газу метану, опасный по пыли, угрожаемый по горным ударам с глубины 150 м, угрожаемый по внезапным выбросам угля и газа с глубины 560 м, не склонен к самовозгоранию; марка угля — Г; приток воды — 17 м³/ч.

Работы в забоях ведутся круглосуточно в 4 смены по 6 ч (рис. 2). Одна из смен техническая, отведена под ремонт и профилактику оборудования, не предусматривает активной добычи угля. Эта смена, как правило, длится с 8 до 14 ч по местному времени (с 0 до 6 ч GMT).

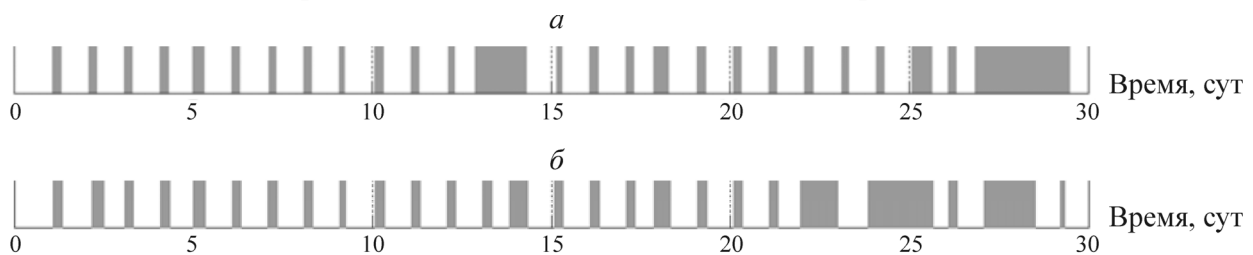


Рис. 2. График профилактических работ: а — Бреевская выработка; б — Толмачевская выработка; ■ — периоды профилактики

Скорость движения лавы в пласте “Бреевский” составляет около 5 м в сутки ($\sim 1/2 \cdot 10^{-4}$ м/с), угледобывающий комбайн работает в возвратно-поступательном режиме. Ширина лавы 220 м, скорость движения комбайна ~ 100 м/ч. Кровля выработанного пространства обрушается.

Скорость движения лавы в пласте “Толмачевский” составляет около 5 м в сутки, угледобывающий комбайн работает в поступательном режиме, обратный ход — холостой. Ширина лавы 260 м, скорость движения комбайна ~ 100 м/ч ($\sim 1/2 \cdot 10^{-4}$ м/с). Кровля выработанного пространства также обрушается.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В работе [19] содержится подробный отчет Алтае-Саянского филиала Геофизической службы (АСФ ГС) СО РАН об исследовании сейсмических активизаций на территории угольного месторождения г. Польшаево. В районе “ощутимости” подземных толчков были расставлены 8 регистраторов сейсмических колебаний “Байкал-АС” [21], остальные располагались на расстоянии 2–7 км (рис. 3, 4) от предполагаемой эпицентральной зоны с целью улучшения локализации очагов и более точной оценки энергетических характеристик сейсмических событий. Всего локальная сеть насчитывала 20 регистраторов. К обработке также привлекались данные с ряда станций региональной сети. Работы по регистрации сейсмических событий проводились в период с 13 августа по 11 сентября 2007 г.



Рис. 3. Конфигурация сети сейсмостанций: красным выделена станция, где произошел карьерный взрыв 18.08.07; М 1:100 000

Для получения информации о скоростях распространения сейсмических волн в данном районе использованы записи промышленного карьерного взрыва на Моховском разрезе, расположенном в 5–6 км от зоны чувствительности сейсмических колебаний. Время взрыва 18.08.07, 05:33 GMT.

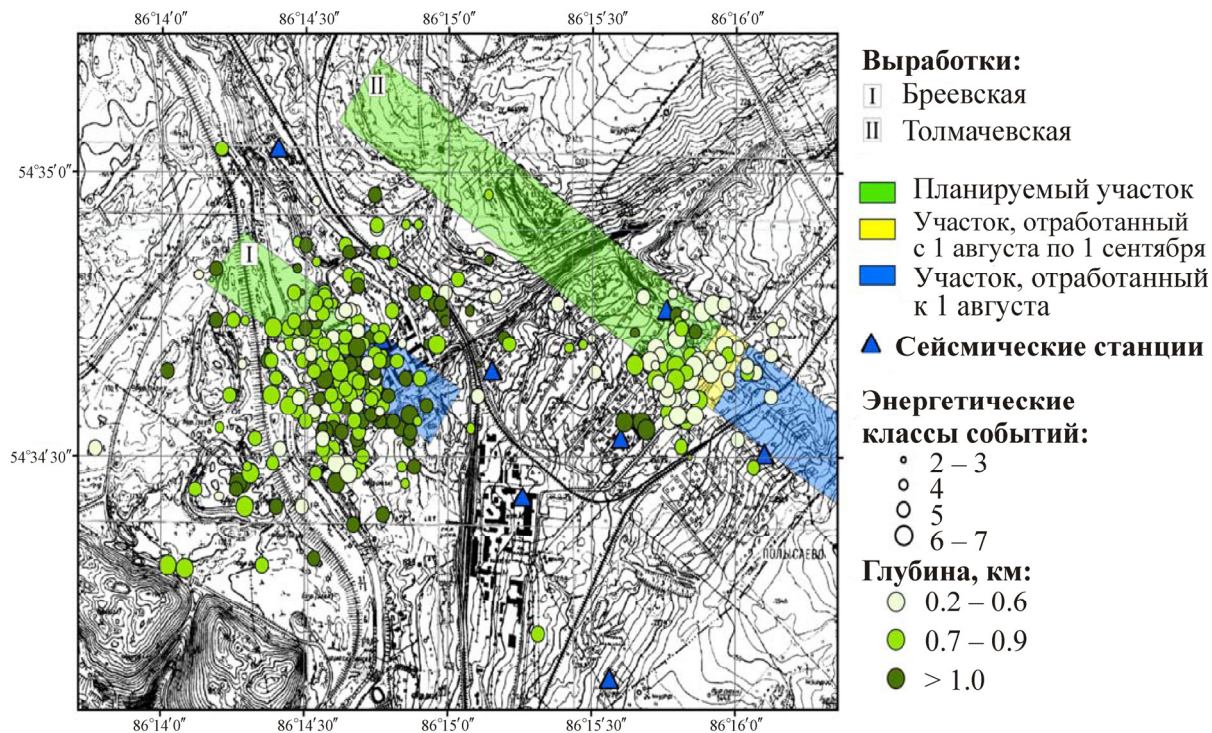


Рис. 4. Карта эпицентров сейсмособытий

По результатам обработки данных регистрации составлен каталог и построена соответствующая карта эпицентров сейсмических событий. Зафиксировано около 400 сейсмособытий в интервале энергетических классов 2 – 7.

Координаты и глубины гипоцентров уточнены с использованием метода сейсмической томографии (рис. 5) с двойными разностями [22].

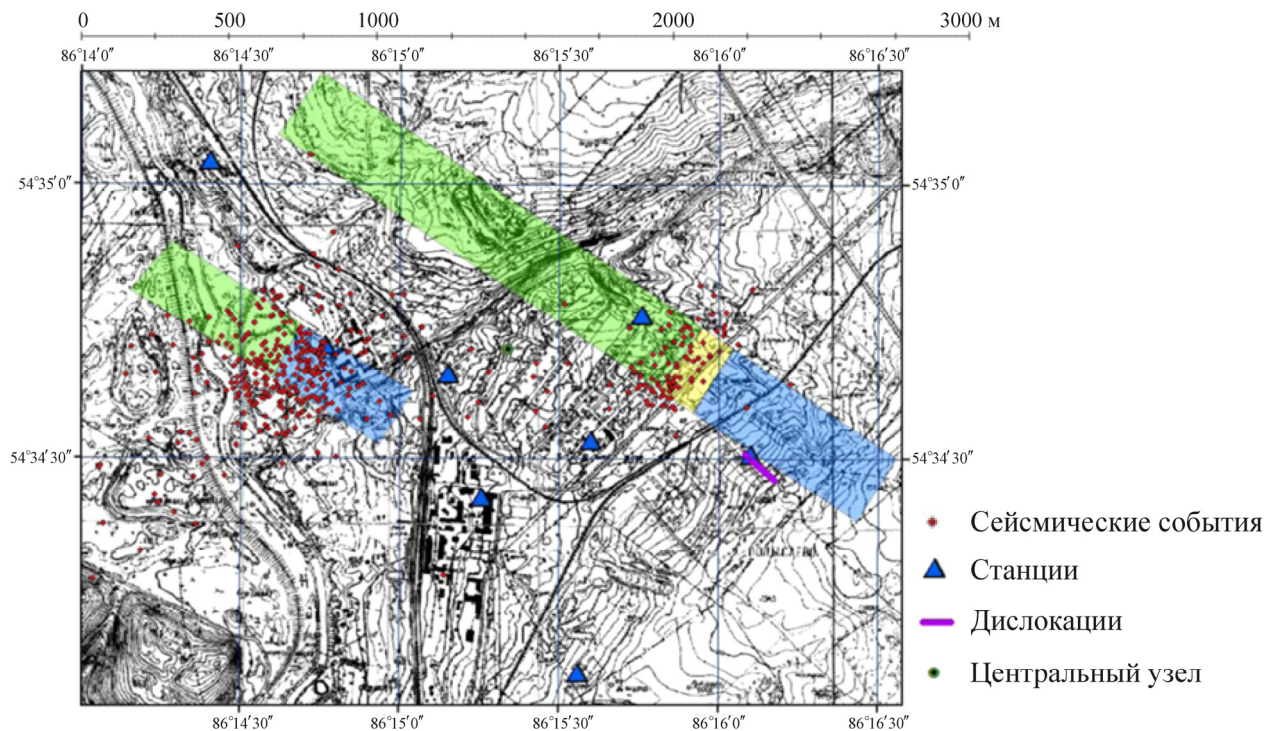


Рис. 5. Эпицентры сейсмических событий, полученные методом сейсмической томографии

Расчет кинематических характеристик. Конфигурация области локализации эпицентров сейсмособытий свидетельствует о наличии двух сейсмоактивных зон, располагающихся в районе действующих горных выработок в угольных пластах “Бреевский” и “Толмачевский” (рис. 6).

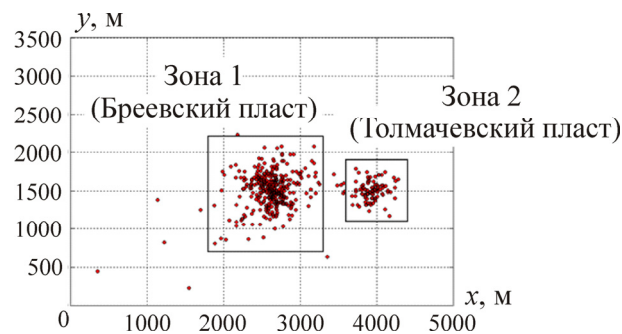


Рис. 6. Карта событий с выделенными зонами сейсмоактивности: ● эпицентры событий

При расчете искомых характеристик использовано время, приведенное к 13.08.07 00:00 GMT, т. е. за некоторый период до начала регистрации сейсмособытий. Энергетический класс сейсмособытий определяем по формуле $K = \log_{10}(E)$, где E — энергия отдельного сейсмособытия, Дж. Расчет искомых кинематических характеристик (V_E , V_K) будем проводить отдельно для каждой зоны локализации сейсмоактивности. На рис. 7 показано развитие сейсмических активизаций во времени для каждой выделенной зоны.

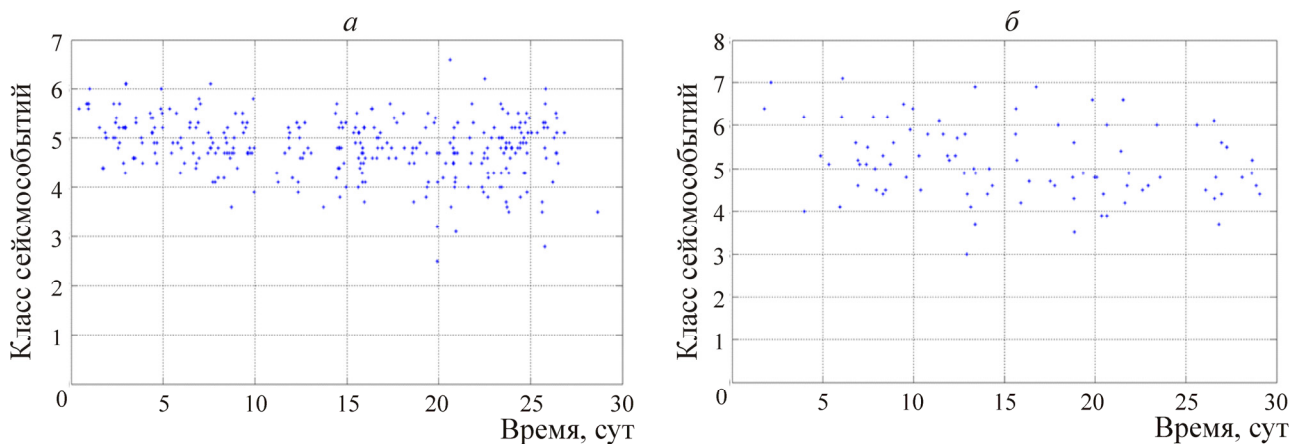


Рис. 7. Развитие сейсмического процесса во времени: а — зона 1 (Бреевский пласт); б — зона 2 (Толмачевский пласт)

“Кажущиеся” скорости миграции для групп сейсмособытий. Для расчета кинематической характеристики V_K (“кажущаяся” скорость миграции отдельных сейсмособытий) применим формулу (2), в которой x_j, y_j, z_j, t_j — координаты и время j -го сейсмособытия; x_0, y_0, z_0, t_0 — координаты и время крупного инициирующего сейсмособытия, повлекшего за собой ряд более мелких по энергоемкости сейсмособытий.

Расчет кинематической характеристики V_K вызывает определенную сложность, так как процесс выделения групп сейсмособытий для вычисления “кажущихся” скоростей затруднен из-за того, что диапазон сейсмособытий по энергии весьма большой, а инициирующее сейсмособытие само может быть инициируемым — когда оно является афтершоком более крупного

сейсмособытия, а присутствие низкоэнергетических сейсмособытий, не являющихся афтершоками, вносит дополнительный разброс возможных значений V_K . В работе [23] выделение таких групп проводилось вручную, а для расчета скоростей написаны соответствующие макросы в электронной таблице Excel. В данном случае для обработки каталога сейсмособытий написана программа в среде Matlab, позволяющая упростить процесс расчета кинематических характеристик, главным образом V_K . Алгоритм выделения “кажущихся” скоростей построен на предположении, что при наличии серии афтершоков от крупного сейсмособытия среди всех ближайших (в течение суток после инициирующего события) и меньших по классу событий распределение значений всех возможных “кажущихся” скоростей для этих событий будет достигать максимума вблизи скорости V_K , которая и является искомой. Все сейсмические события, зарегистрированные в течение суток после какого-либо события и имеющие меньший энергетический класс, будем в дальнейшем называть “группой”. Под афтершоками понимаются те события из группы, которые появляются через такое время t и на таком расстоянии d после инициирующего события, что $V_K = d/t$ принимает близкие значения для всех этих событий. В данном случае имеет смысл оценить лишь порядок величины и проследить характер ее изменения во времени. Для этого необходимо построить распределение значений “кажущейся” скорости в группе от каждого события.

Пример такого распределения от случайно выбранного инициирующего события классом 5, 6 приведен на рис. 8. Для оценки порядка величины V_K рассчитаем количество значений “кажущейся” скорости, попадающих в интервал с центром в максимуме распределения $\log_{10}(V_K)$ шириной 1. Тогда искомое распределение примет вид, представленный на рис. 9.

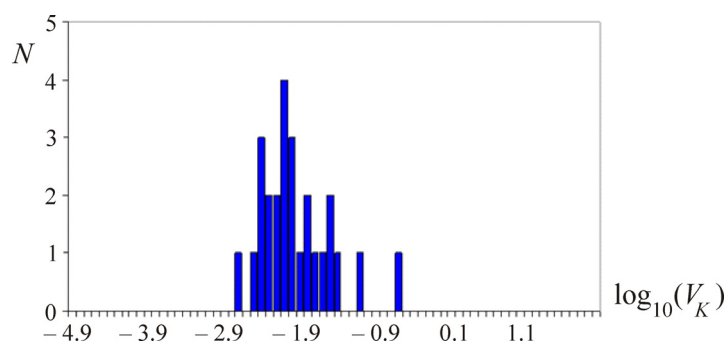


Рис. 8. Распределение значений “кажущихся” скоростей в группе, инициированной сейсмособытием класса 5, 6 в зоне 1: ■ — количество значений скорости в бине

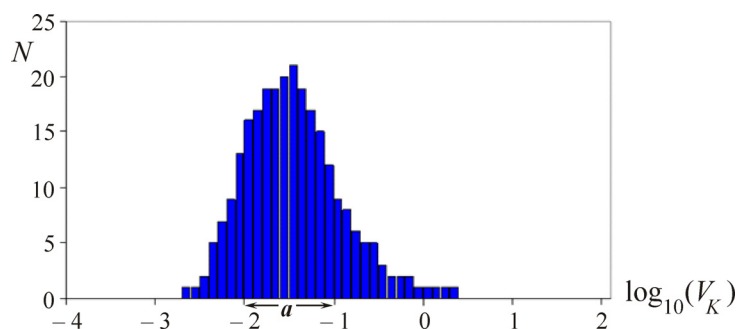


Рис. 9. Оценка максимума распределения “кажущихся” скоростей в группе, инициированной сейсмособытием класса 5, 6 в зоне 1: в центре интервала a — бин, содержащий значения скорости V_K (м/с), попадающие в интервал a ; ■ — количество значений скорости в бине

Рассчитав такие распределения для всех сейсмособытий, построим общую картину распределения фактических значений “кажущейся” скорости с точностью до порядка для каждой зоны (рис. 10, 11). На приведенных диаграммах каждая вертикальная полоса имеет условную ширину, равную единице, и соответствует одному из событий, являясь, по сути, диаграммой распределения значений “кажущейся” скорости в группе от этого события, как на рис. 9. Это позволяет с точностью до порядка оценить значение, которому соответствует максимум распределения значений V_K для каждого события.

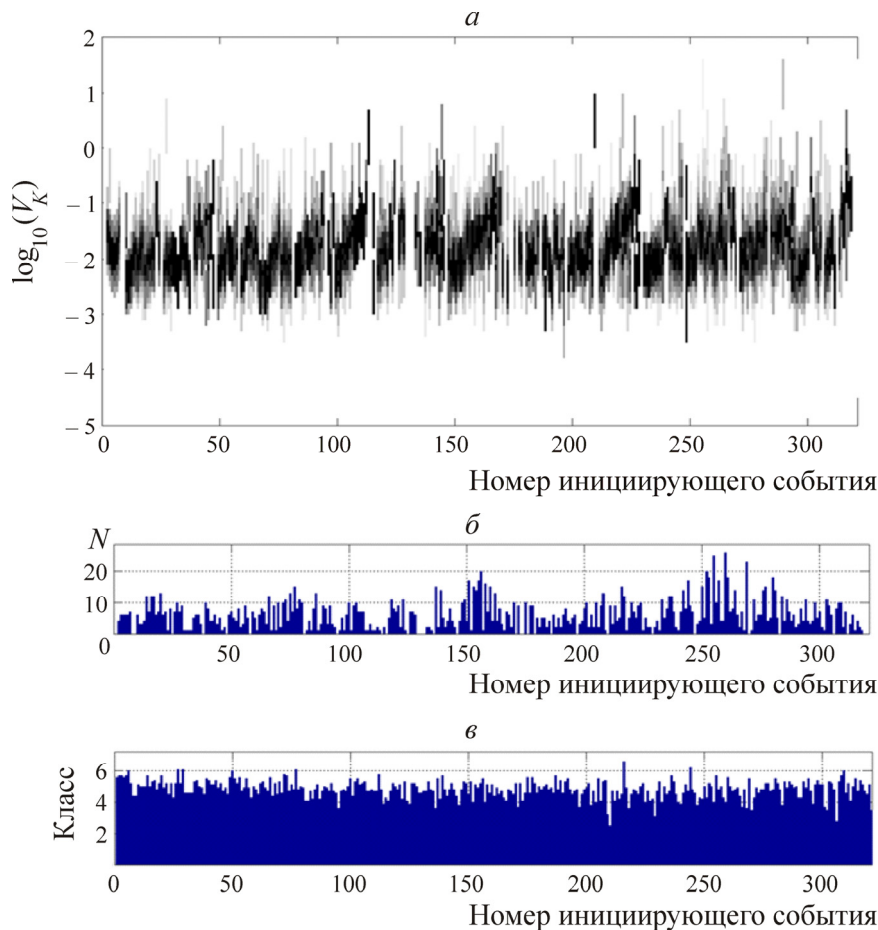


Рис. 10. Распределение значений “кажущихся” скоростей (а) для всех событий в зоне 1 (Бреевский пласт): б — количество; в — классы

Отфильтруем из полученных диаграмм все инициирующие сейсмособытия, имеющие энергетический класс меньше 6, а также все сейсмособытия, инициирующие серию, состоящую менее чем из 3 инициированных событий. Максимумы распределений “кажущихся” скоростей для оставшихся событий принимают значения, приведенные на рис. 12.

Как видно, значения V_K в течение всего периода наблюдений меняются слабо, поэтому при расчете кинематической характеристики (1) значение V_K будем считать постоянным и равным среднему его значению для каждой зоны:

$$\text{для зоны 1: } V_K = \langle V_K \rangle = \text{const} = 0.0114 \text{ м/с};$$

$$\text{для зоны 2: } V_K = \langle V_K \rangle = \text{const} = 0.0218 \text{ м/с}.$$

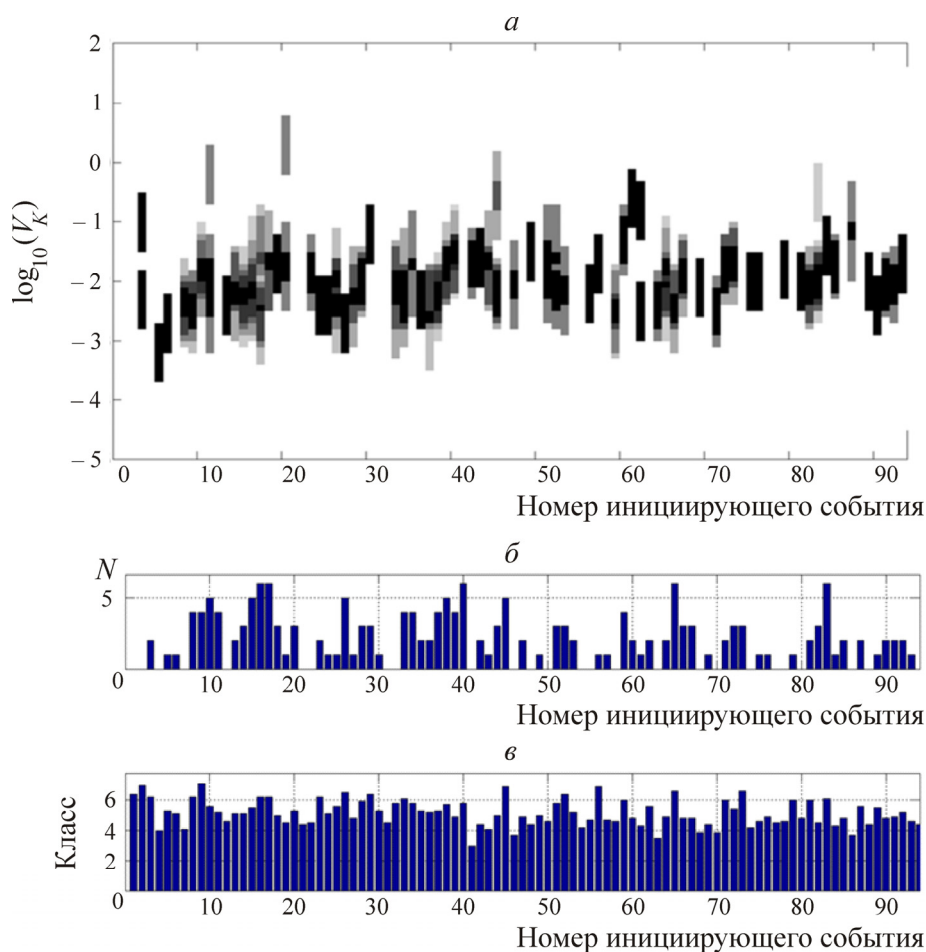


Рис. 11. Распределение значений “кажущихся” скоростей (а) для всех событий в зоне 2 (Толмачевский пласт); б — количество; в — классы



Рис. 12. “Кажущиеся” скорости V_K для инициирующих событий класса ≥ 6 : а — зона 1 (Бревенский пласт); б — зона 2 (Толмачевский пласт)

Для анализа характера зависимости от времени кинематического критерия $\chi(t)$, согласно (1), проследим характер развития во времени его переменной части $V_E(t)$. Необходимо отметить, что V_K принимает значения, близкие к полученным в [1–4].

Скорости миграции приведенных центров сейсмозергвыделения. Расчет кинематической характеристики V_E выполнялся по формуле

$$V_E = \frac{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}{\Delta t_0}, \quad (3')$$

где i — номер периода; Δt_0 — длина периода; x_i, y_i, z_i — координаты центра энергвыделения для i -го периода.

Длина периода Δt_0 может варьировать в зависимости от характера развития сейсмического процесса во времени, плотности событий и размеров зон. В нашем случае в период профилактических работ наблюдается резко пониженное сейсмозергвыделение (рис. 13, 14), что отмечено в работе [19]. Таким образом, при вычислении сейсмозергвыделения и скорости миграции его приведенного центра оптимальным периодом для вычислений считаем суточный период. В данном случае в каждом периоде содержится хотя бы один период профилактических работ, а влияние режима работы комбайна на сейсмозергвыделение в известной мере нивелируется.

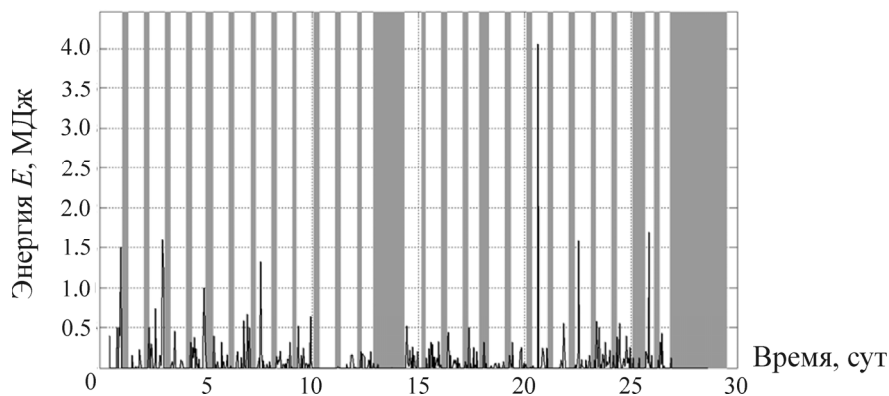


Рис. 13. Почасовое сейсмозергвыделение в зоне 1 (Бревевский пласт) и профилактические периоды (■)

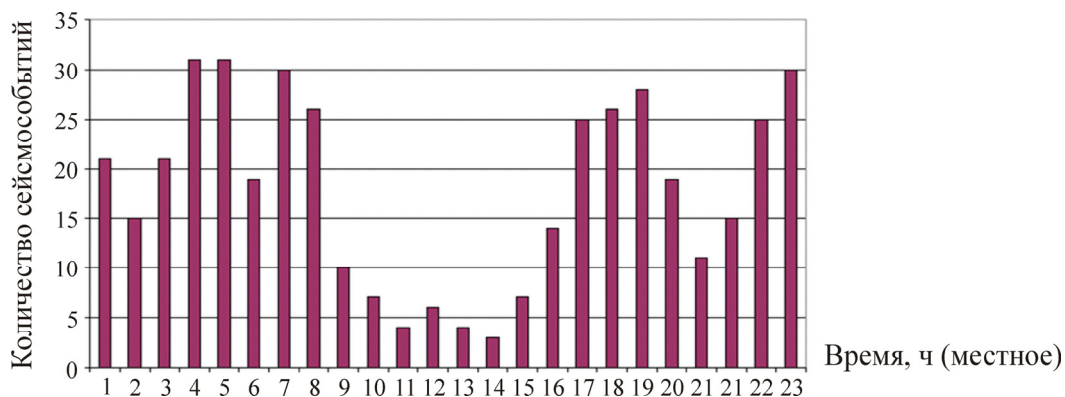


Рис. 14. Распределение сейсмособытий в зависимости от времени суток

В качестве i -го приведенного центра энергвыделения возьмем средневзвешенный центр энергвыделения отдельных сейсмособытий (аналогично понятию “центр масс”), произошед-

ших за i -й период: $(t_0 + t_i; t_0 + t_i + \Delta t_0)$, t_0 — начало отсчета (в нашем случае — 13.08.07 00:00 GMT), t_i — начало i -го периода, при этом $t_{i+1} = t_i + s$, где $s < \Delta t_0$ — сдвиг периода по времени.

Координаты $r_i = (x_i, y_i, z_i)$ приведенного центра сейсмозерговыведения определим по формуле [10]

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^n r_j E_j}{\sum_{j=1}^n E_j}, \quad (4)$$

где n — количество; $r_i = (x_j, y_j, z_j)$ — координаты; E_j — энергия отдельных сейсмособытий, зарегистрированных в i -м периоде.

Полученные значения скоростей миграции приведенного центра сейсмозерговыведения представлены на рис. 15. Средние значения V_E для пластов “Бреевский” и “Толмачевский” составили $5.6 \cdot 10^{-3}$ и $6.4 \cdot 10^{-3}$ м/с соответственно.

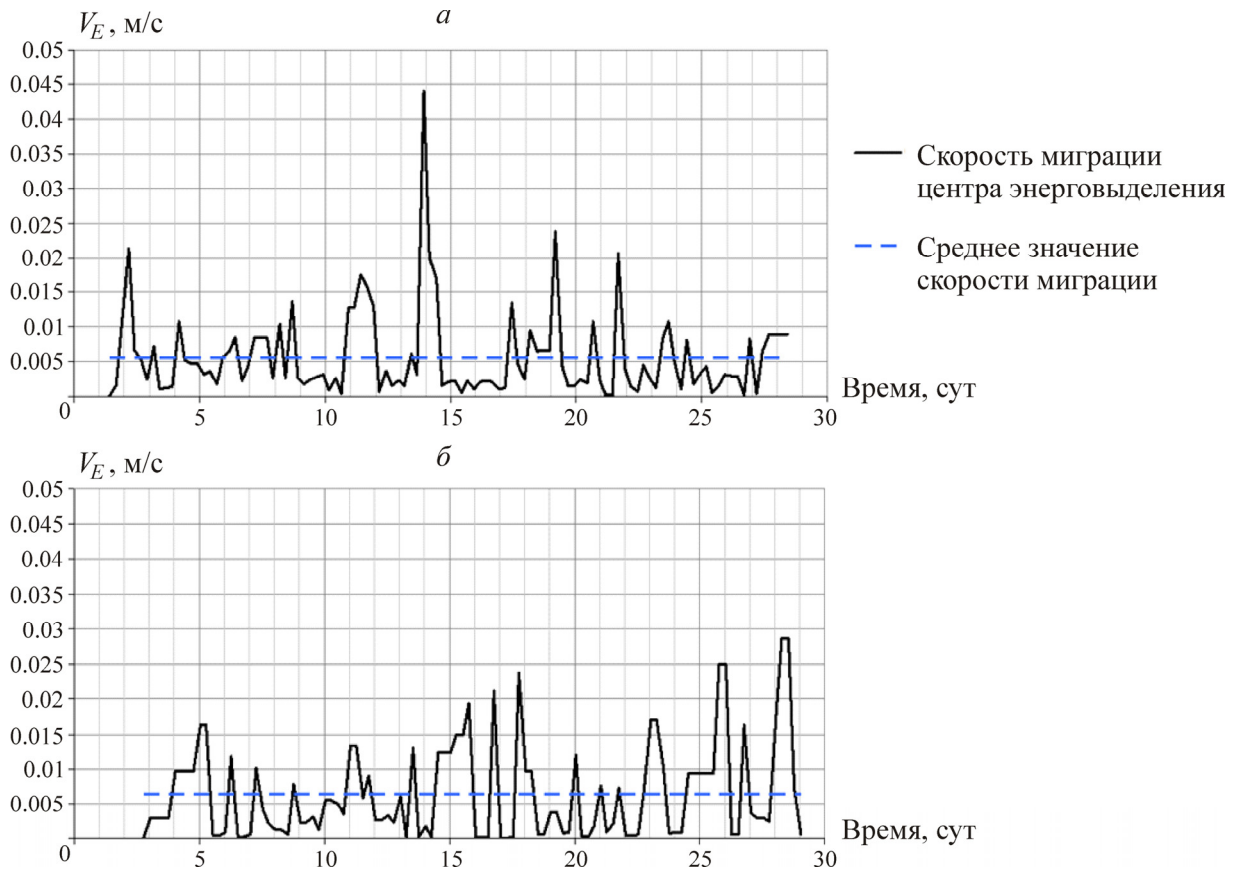


Рис. 15. Зависимость скорости миграции приведенного центра суточного сейсмического энерговыделения от времени: a — зона 1 (Бреевский пласт); $б$ — зона 2 (Толмачевский пласт)

На рис. 16 показаны траектории миграции приведенных центров сейсмозерговыведения для зон 1 и 2 с периодом 1 сут, а на рис. 17 — 5 сут для определения общего характера смещения центров сейсмозерговыведения в пределах сравниваемых угольных пластов.

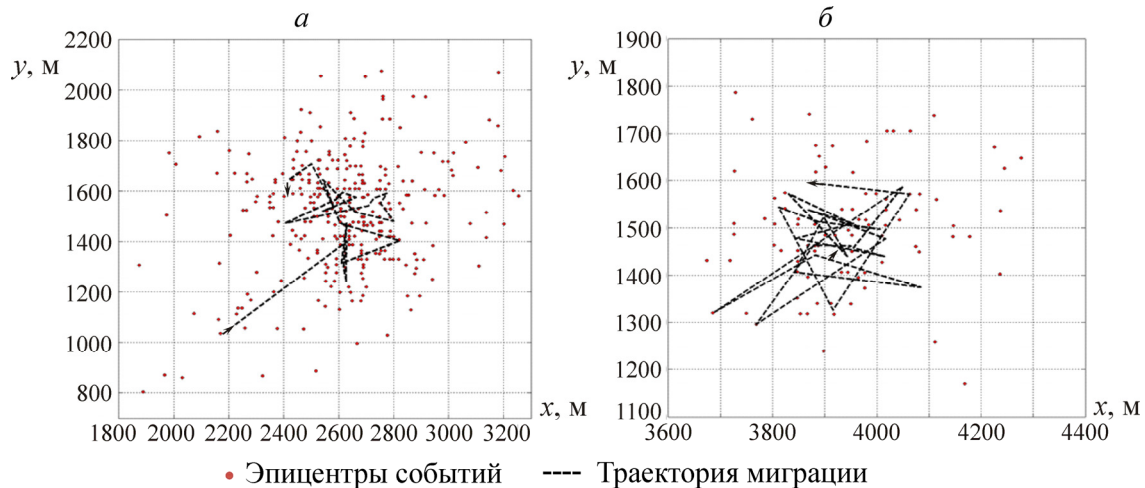


Рис. 16. Траектория миграции приведенного центра суточного сейсмического энерговыделения: *a* — зона 1 (Бреевский пласт); *б* — зона 2 (Толмачевский пласт)

Можно отметить, что характерный размер области миграции центра сейсмоэнерговыделения составляет около 500 м в зоне 1 и 400 м в зоне 2, при этом собственные размеры зон 1500 и 900 м соответственно. Отношение диаметра общей площади сейсмоэнерговыделения $D(i)$ к диаметру площади, занимаемой приведенным центром сейсмоэнерговыделения $\Delta(i)$ для сравниваемых зон $i = 1, 2$, обозначим $\gamma_i = D(i) / \Delta(i)$. Тогда для зоны 1 $\gamma \approx 3$, для зоны 2 $\gamma \approx 2$. Данная характеристика отражает меру локализованности центра энерговыделения, которая может быть связана с механизмом активизации сейсмособытий и требует дальнейшего изучения на различных объектах.

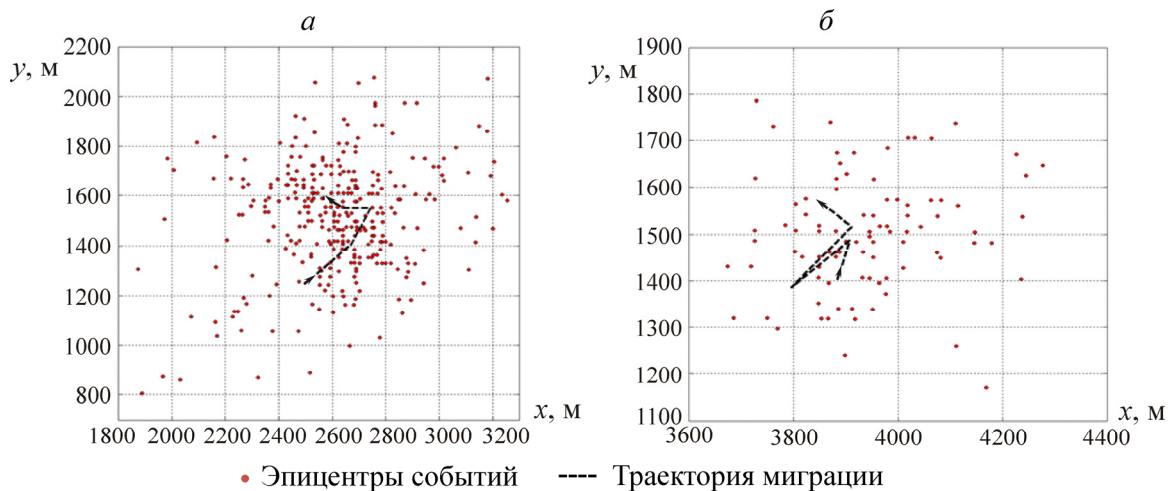


Рис. 17. Траектория миграции приведенного центра 5-суточного сейсмического энерговыделения: *a* — зона 1 (Бреевский пласт); *б* — зона 2 (Толмачевский пласт)

Как видно из рис. 17, общее направление движения вдоль траектории приведенного центра сейсмоэнерговыделения совпадает с заданным направлением продвижения лавы, а соответствующая скорость вдоль этого направления принимает значения в интервале от 0 до 20 м в сутки (в среднем около 4 м в сутки). Это согласуется также со средней скоростью движения лавы. Следовательно, можно говорить о наличии детерминированной связи между технологическими параметрами ведения горных работ и сопутствующим сейсмоэмиссионным процессом.

Сейсмоэнерговыведение и его связь с кинематическими характеристиками. Зависимость суточного сейсмоэнерговыведения от времени в пределах выделенных зон определяется как функция

$$W(t_i; t_i + \Delta t_0) = \sum_{j=1}^n E_j, \quad (5)$$

где n — количество; E_j — энергия отдельных сейсмособытий, зарегистрированных в i -м периоде.

Суточное сейсмоэнерговыведение характеризует общую геомеханическую ситуацию в горном массиве вблизи выработок (рис. 18, 19). Так, в случае повышенного энерговыведения наиболее вероятны особо мощные сейсмособытия классом 6 и выше (рис. 19), которые могут проявляться в виде горных ударов, тем самым создавая опасную обстановку на предприятии.

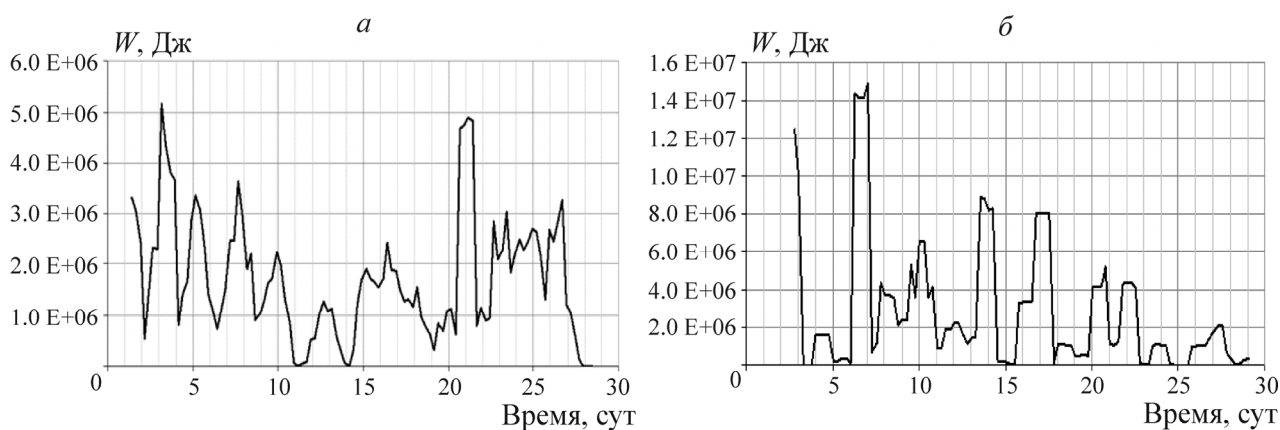


Рис. 18. Зависимость суточного сейсмоэнерговыведения от времени: *а* — зона 1 (Бреевский пласт); *б* — зона 2 (Толмачевский пласт)

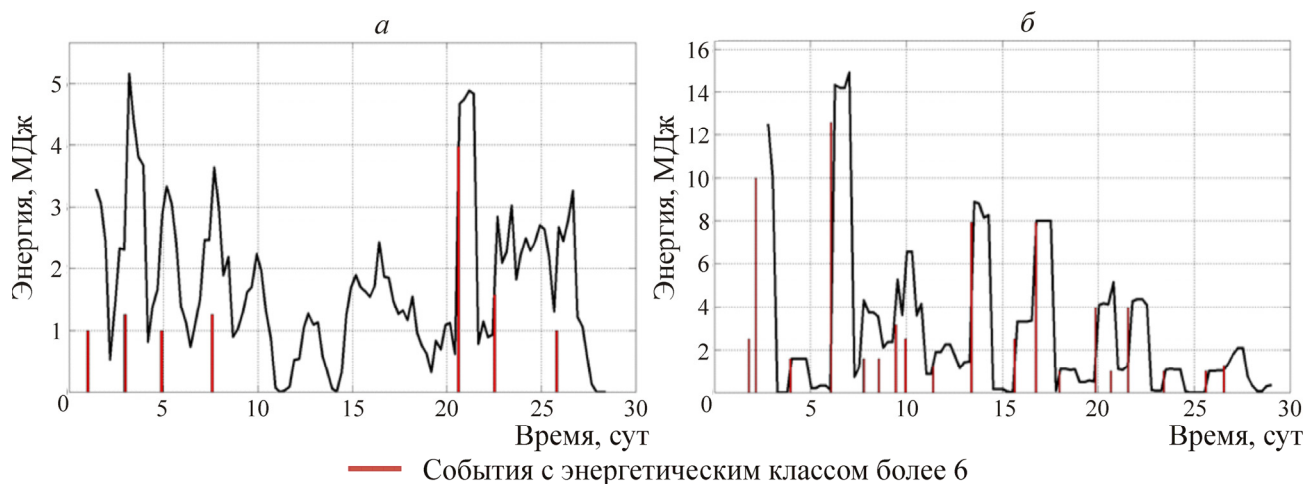


Рис. 19. Графики суточного сейсмоэнерговыведения и отметки особо мощных событий: *а* — зона 1 (Бреевский пласт); *б* — зона 2 (Толмачевский пласт)

Как видно из рис. 20, повышенное сейсмоэнерговыведение в большинстве своем связано с высокоэнергетическими событиями, что особенно хорошо проявляется в зоне 1 на 21-е сутки и в зоне 2 на 6-е сутки.

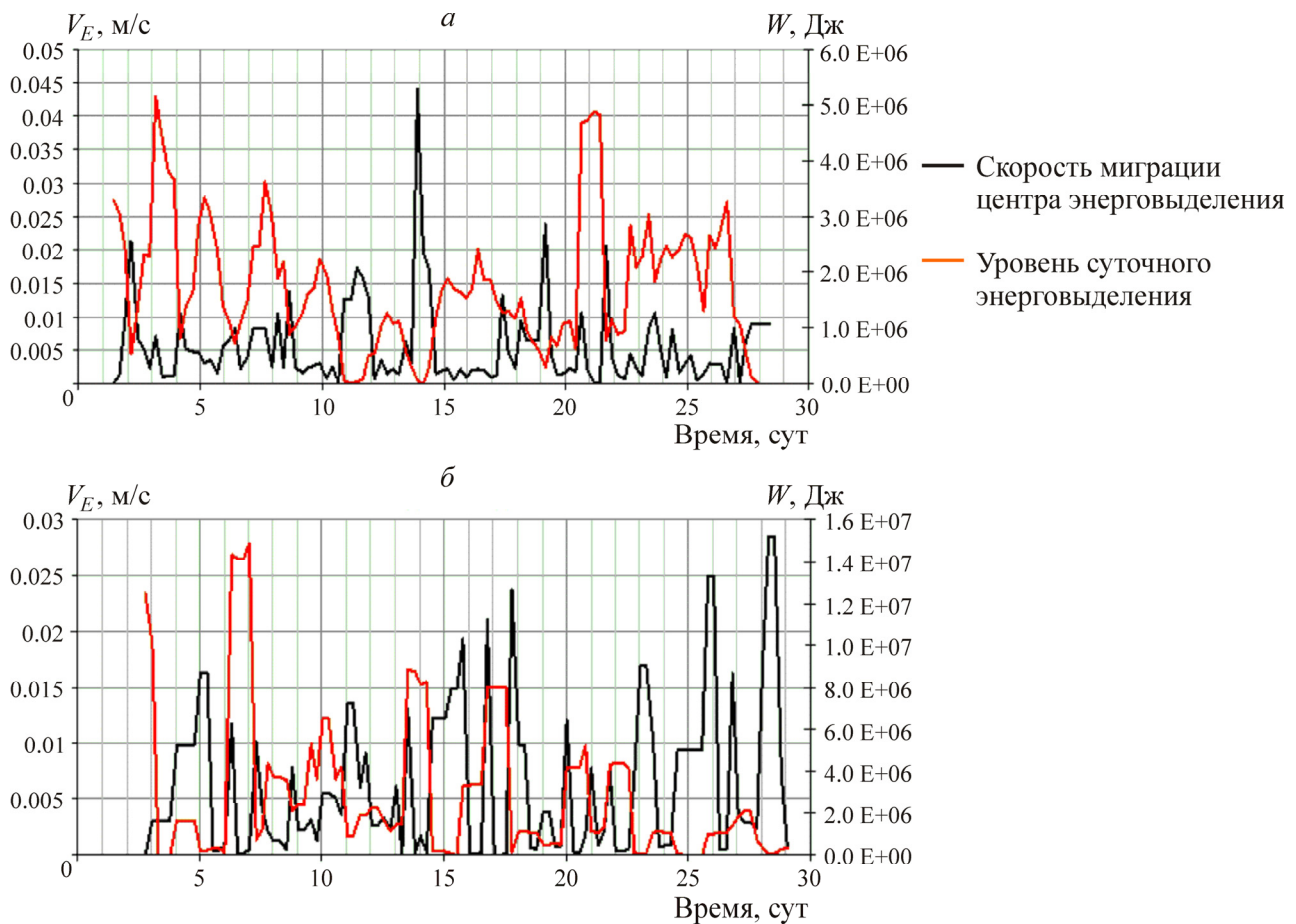


Рис. 20. Распределение скоростей миграции центра энерговыделения V_E и уровни суточного энерговыделения W : а — зона 1 (Бреевский пласт); б — зона 2 (Толмачевский пласт)

В работах [1–4] отмечено, что удароопасной обстановке на рудниках Норильского месторождения соответствует пониженное значение кинематической характеристики $\chi(t) = V_E / V_K$. Так как, согласно приведенным выше данным, $V_K(t) = \text{const}$ для каждой контролируемой зоны угольных пластов, то характер зависимости $\chi(t)$ будет практически соответствовать поведению $V_E(t)$.

Полученные зависимости энерговыделения $W(t)$ и скорости миграции центра энерговыделения $V_E(t)$ в зонах сейсмических активизаций, соответствующих Бреевской и Толмачевской выработкам, сведены в единые графики для сравнения и представлены на рис. 20.

Видно, что пониженным значениям $V_E(t)$ соответствуют пики сейсмоэнерговыделения $W(t)$. Для установления тесноты связи между этими зависимостями вычислим коэффициент ранговой корреляции по Спирмену для каждой зоны [24]:

$$r = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (6)$$

где $\sum d^2$ — сумма квадратов разностей рангов; n — число сравниваемых значений.

В результате выполненных расчетов по (6) для зоны 1 имеем $r_1 = -0.44$, для зоны 2 — $r_2 = -0.53$. Это соответствует средней тесноте установленной связи.

ОБСУЖДЕНИЕ И ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных результатов исследований обратим особое внимание на следующие факты.

Во-первых, это наличие тесной корреляционной связи между скоростями миграции приведенных центров суточного сейсмоэнерговыведения и общим уровнем суточного сейсмоэнерговыведения в пределах контролируемых зон пластов “Бреевский” и “Толмачевский” шахты Польшаевская (коэффициенты ранговой корреляции равны соответственно 0.44 и 0.53). В этих условиях диагностический параметр χ для оценки удароопасности породных массивов рудных месторождений оказался перспективным и для прогнозирования крупных динамических событий в пределах угольных шахт. Здесь кинематический параметр $V_K(t)$ в выражении (1) для χ есть величина существенно постоянная в пределах выделенных зон: для Бреевского пласта среднее значение $\langle V_K \rangle \approx 1.4 \cdot 10^{-2}$ м/с, для Толмачевского пласта $\langle V_K \rangle \approx 2.18 \cdot 10^{-2}$ м/с. Следовательно, “оперативно” удароопасность контролируемых зон можно описывать кинематической характеристикой $V_E(t)$ в выражении (1) для χ — скоростью суточной миграции приведенного центра сейсмоэнерговыведения. Для Бреевского пласта этот параметр изменяется в контрольный период времени в скоростном диапазоне до $4.5 \cdot 10^{-3}$ м/с ($\langle V_E \rangle \sim (0.5 \div 1) \cdot 10^{-2}$), а для Толмачевского пласта — до $2.8 \cdot 10^{-3}$ м/с ($\langle V_E \rangle \sim (0.5 \div 1) \cdot 10^{-2}$).

Нетрудно видеть, что по значениям $\langle V_K \rangle$ и $\langle V_E \rangle$ выражение (1) дает следующие оценки:

$$\langle \chi \rangle = \frac{\langle V_E \rangle}{\langle V_K \rangle} \approx \begin{cases} 0.36 \div 0.71 \text{ (среднее 0.54)} - \text{ для Бреевского пласта,} \\ 0.23 \div 0.46 \text{ (среднее 0.35)} - \text{ для Толмачевского пласта.} \end{cases}$$

По критерию χ Толмачевский пласт является более удароопасным, чем Бреевский ($0.35 < 0.54$).

Во-вторых, и это тоже свидетельствует о повышенной удароопасности Толмачевского пласта, в пределах последнего энергетические классы доминирующих сейсмособытий несколько выше — от 3 до 7 (в среднем около 5). С рассматриваемой точки зрения для угольных пластов отмечено более жесткое сейсмоэнерговыведение, чем в условиях полиметаллических руд Талнахско-Октябрьского месторождения [1–4]. Это можно объяснить различной скоростью извлечения породной массы и соответственно различием используемых технологий ведения горных работ, физико-механическими свойствами породных массивов [25, 26]. В известной мере это коррелирует и со средней глубиной залегания сравниваемых пластов: 410 м — Бреевский пласт, 440 м — Толмачевский.

Таким образом, целесообразно ввести *новое понятие* — **коэффициент относительной жесткости сейсмоэнерговыведения** (λ) для сравниваемых сейсмоактивных зон i и j :

$$\lambda(i, j) = \frac{1}{V(i)N(i)} \sum_{k=1}^{N(i)} E_k(i) / \frac{1}{V(j)N(j)} \sum_{k=1}^{N(j)} E_k(j), \quad (7)$$

где $V(\dots)$, $N(\dots)$ и $E(\dots)$ — соответственно объемы контролируемых зон (м^3), количество и энергия (Дж) сейсмособытий в пределах этих зон, отмеченных индексными аргументами (i или j). Нормируя определенным образом знаменатель в (7), можно ввести понятие “**абсолютной жесткости сейсмоэнерговыведения**”. В какой-то степени — это вопрос “стандартизации” используемых здесь параметров.

В-третьих (и это связано с понятием жесткости сейсмоэнерговыведения), обращают на себя внимание отношения характерных линейных размеров некоторых областей в плоскостных проекциях отдельно для каждого из сравниваемых угольных пластов: диаметра общей площади сейсмоэнерговыведения (D_1), диаметров областей миграции суточного (D_2) и пятисуточного

(D_3) приведенных центров сейсмозерговыведения, а также ширины отрабатываемой лавы (D_0) (рис. 6, 16, 17). Диаметры этих областей определяются по длине диагоналей соответствующих прямоугольников минимальной площади, включающих выделенные области.

- Для пласта “Бреевский”:

$$D_0 = 220 \text{ м}, \quad D_1 \approx 2121 \text{ м}, \quad D_2 \approx 846 \text{ м}, \quad D_3 \approx 265 \text{ м}.$$

Отсюда следуют пропорции:

$$\frac{D_1}{D_0} \approx 9.6; \quad \frac{D_2}{D_0} \approx 3.9; \quad \frac{D_3}{D_0} \approx 1.2.$$

Как видно, диаметр облака индуцированной сейсмичности при отработке пласта “Бреевский” превышает ширину отрабатываемой лавы примерно в 10 раз; в то же время диаметр области, “заметаемой” центром приведенного пятисуточного сейсмозерговыведения почти равен ширине лавы.

- Для пласта “Толмачевский”:

$$D_0 = 260 \text{ м}, \quad D_1 \approx 2121 \text{ м}, \quad D_2 = 500 \text{ м}, \quad D_3 = 150 \text{ м}.$$

Отсюда следуют пропорции:

$$\frac{D_1}{D_0} \approx 4; \quad \frac{D_2}{D_0} \approx 1.92; \quad \frac{D_3}{D_0} \approx 0.58.$$

В этом случае диаметр облака индуцированных сейсмозерговыведения превышает ширину отрабатываемой лавы в 4 раза, а вот диаметр области, “заметаемой” центром приведенного пятисуточного сейсмозерговыведения почти наполовину меньше ширины лавы.

Используя каноническую шкалу структурно-иерархических представлений с основанием $\sqrt{2}$ [27, 28], запишем следующие представления для D_i ($i = 0, 1, 2, 3$):

- для пласта “Бреевский”:

$$D_1 \approx D_0(\sqrt{2})^6; \quad D_2 \approx D_0(\sqrt{2})^4; \quad D_3 \approx D_0 \quad (D_0 \approx 220 \text{ м});$$

- для пласта “Толмачевский”:

$$D_1 \approx D_0(\sqrt{2})^4; \quad D_2 \approx D_0(\sqrt{2})^2; \quad D_3 \approx D_0(\sqrt{2})^{-2} \quad (D_0 = 260 \text{ м}).$$

Из этих представлений становится очевидным вывод о том, что показатели степени при основании $\sqrt{2}$ можно использовать одновременно и в качестве меры “притяжения” (минимальные значения) и в качестве меры общего влияния (максимальные значения) отрабатываемой лавы при развитии нелинейных геомеханических процессов в окрестных массивах горных пород. Линейные масштабы этих областей влияния в рассмотренных случаях отличаются практически в 2 раза, несмотря на близкие значения ширины отрабатываемых лав. Подобное свидетельствует о том, что в описанный период времени область повышенной концентрации напряжений в условиях пласта “Толмачевский” в 2 раза ближе к отрабатываемой лаве, чем для пласта “Бреевский”. С учетом этого и разницы по глубине залегания отрабатываемых лав можно объяснить наблюдаемый в первом случае более жесткий режим сейсмозерговыведения.

В-четвертых, с позиций причинно-следственных связей существенный интерес представляют отношения кинематических характеристик для сравниваемых угольных пластов: средней скорости отработки лавы $\langle v_1 \rangle$, средней скорости движения очистного комбайна $\langle v_2 \rangle$, $\langle V_E \rangle$ и $\langle V_K \rangle$ в пределах контролируемых зон.

- Для пласта “Бреевский” (см. рис. 15а) имеем:

$$\langle v_1 \rangle \approx 5 \text{ м/сут} \approx 5.8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с};$$

$$\langle v_2 \rangle \approx 100 \text{ м/ч} \approx 2.8 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

$$\langle V_E \rangle \in (0.5 \div 1) \cdot 10^{-2} \text{ м/с} \sim 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с};$$

$$\langle V_K \rangle \approx 1.4 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

Из приведенных оценок следует, что скоростные значения $\langle v_2 \rangle$, $\langle V_E \rangle$ и $\langle V_K \rangle$ не только одного порядка, но и в рамках доверительного интервала весьма близки по абсолютной величине: $(0.5 \div 3) \cdot 10^{-2}$ м/с. С другой стороны, получим следующее соотношение:

$$\frac{\langle v_1 \rangle}{\langle v_j \rangle} \in (0.2 \div 1.2) \cdot 10^{-2} \quad (j = 2, E, K).$$

- Для пласта “Толмачевский” (см. рис. 15б) имеем:

$$\langle v_1 \rangle \approx 5 \text{ м/сут} \approx 5.8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с};$$

$$\langle v_2 \rangle \approx 100 \text{ м/ч} \approx 2.8 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

$$\langle V_E \rangle \in (0.5 \div 1) \cdot 10^{-2} \text{ м/с} \sim 7.5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с};$$

$$\langle V_K \rangle \approx 2.2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}.$$

В данном случае получим ту же оценку:

$$\frac{\langle v_1 \rangle}{\langle v_j \rangle} \in (0.2 \div 1.2) \cdot 10^{-2} \quad (j = 2, E, K).$$

Из приведенных оценок для отношений кинематических характеристик $\langle v_1 \rangle$ и $\langle v_2 \rangle$ следует, что они практически совпадают с геомеханическим инвариантом $\mu_\Delta(\delta)$ для напряженных геосред [12], описывающим статистическое распределение отношений среднего раскрытия трещин к диаметрам отделяемых ими геоблоков и существенно зависящим от напряженно-деформированного состояния массивов горных пород [7].

ВЫВОДЫ

Проведенный эксперимент и его общий анализ позволяют заключить, что предложенный в работах [1–4] критерий χ оценки удароопасности массивов горных пород при отработке буровзрывным способом полиметаллических руд Талнахско-Октябрьского месторождения применим и для условий отработки угольных месторождений Кузбасса. Входящие в выражение для χ кинематические характеристики миграционных процессов сейсмоэнерговыведения в пределах угольных пластов “Бреевский” и “Толмачевский” г. Полысаево (Кемеровская обл.) непосредственно связаны с параметрами и режимом ведения горных работ лавами с применением комбайнового способа. В основе этой связи — геомеханический инвариант $\mu_\Delta(\delta)$, описывающий статистическое распределение среднего раскрытия трещин к диаметрам отделяемых ими структурных элементов в напряженных массивах горных пород. Этот параметр также лежит в основе активно развиваемой ныне теории волн маятникового типа [8, 29].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др. О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. I. Сейсмический режим // ФТПРПИ. — 2004. — № 4.

2. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др.** О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. II. Рудник “Октябрьский” // ФТПРПИ. — 2004. — № 5.
3. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др.** О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. III. Рудник “Таймырский” // ФТПРПИ. — 2004. — № 6.
4. **Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Востриков В. И. и др.** О возможных причинах увеличения сейсмической активности шахтных полей рудников “Октябрьский” и “Таймырский” Норильского месторождения в 2003 г. Ч. IV. Влияние площадей подработки налегающих породных массивов // ФТПРПИ. — 2005. — № 1.
5. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Леонтьев А. В. и др.** Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
6. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
7. **Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф. и др.** Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010.
8. **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. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.
9. **Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др.** Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. — Т. 2.
10. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А.** Об одном методе сканирования шахтной сейсмологической информации // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 6.
11. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. II // ФТПРПИ. — 2000. — № 4.
12. **Курленя М. В., Опарин В. Н., Еременко А. А.** Об отношении линейных размеров блоков горных пород к величинам раскрытия трещин в структурной иерархии массивов // ФТПРПИ. — 1993. — № 3.
13. **Новожилов В. В.** Теория упругости. — Л.: Судостроение, 1958.
14. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндз М.** Фейнмановские лекции по физике. — М.: Мир, 1976. — Т. 1. — Ч. 3 – 4.
15. **Опарин В. Н.** Волны маятникового типа и “геомеханическая температура” / Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: тр. 2-й Рос.-Кит. науч. конф. (2–5 июля 2012 г.). — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
16. **Николаев А. В.** Проблемы наведенной сейсмичности / Наведенная сейсмичность. — М.: Наука, 1994.
17. **Холуб К.** Наведенная сейсмичность при добыче угля лавами в шахтах Чехии // ФТПРПИ. — 2007. — № 1.
18. **Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лескова Е. В. и др.** Сейсмический мониторинг района г. Осинники (Кемеровская область) / Землетрясения в России в 2005 году. — Обнинск: ГС РАН, 2007.
19. **Еманов А. А., Еманов А. Ф., Лескова Е. В. и др.** Научно-технический отчет по муниципальному контракту № 3 от 14.08.07 г. “Экспериментальные исследования сейсмических процессов на территории г. Польшаево”. — Новосибирск: АСФ ГС СО РАН, 2008.
20. **Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лескова Е. В. и др.** Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физ. мезомеханика. — 2009. — № 12.

21. Семибаламут В. М., Рыбушкин А. Ю. Комплекс автономных регистраторов сейсмических сигналов высокого разрешения / Тр. Междунар. конф. "Проблемы сейсмологии III тысячелетия". — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003.
22. Zahng H., Thurber C.H. Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward Fault, California, Bull. Seism. Soc. Amer., 2003, Vol. 93, No. 5.
23. Макаров А. Б., Сатов М. Ж., Юн А. Б. Мониторинг, диагностика и прогноз техногенной сейсмичности на Жезказганском месторождении меди / Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. — Апатиты: ГоИ КНЦ РАН, 2004. — Ч. 2.
24. Ван дер Варден Б. Л. Математическая статистика. — М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
25. Опарин В. Н., Тапсиев А. П., Богданов М. Н. и др. Современное состояние, проблемы и стратегия развития горного производства на рудниках Норильска. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
26. Посохов Г. Е. Геотехнология подземной разработки пластовых месторождений / под ред. А. М. Фрейдина. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012. — Ч. 1, 2.
27. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А., Балмашнова Е. Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. — 1998. — № 5.
28. Опарин В. Н., Танайно А. С. Каноническая шкала иерархических представлений в горном поведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
29. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа U_k // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4.

Поступила в редакцию 17/VI 2013