

УДК 550.34 + 550.8.01

**ВОЗБУЖДЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПОТОКОМ ВОДЫ В ТРЕЩИНЕ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ПАРАМЕТРОВ ПО РЕГИСТРИРУЕМОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ**

С. В. Сердюков, А. В. Азаров

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

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

Приведены результаты численных и экспериментальных исследований возбуждения сейсмического излучения потоком воды в трещине. Показана возможность дистанционного контроля параметров потока по амплитудно-частотной характеристике регистрируемых колебаний. Даны рекомендации по включению инфранизкочастотных наблюдений в систему сейсмического мониторинга горнодобывающих предприятий, опасных по гидродинамической обстановке.

Породный массив, трещина, поток воды, сейсмическое излучение, амплитуда и частота упругих колебаний, математическое моделирование, натурный эксперимент

DOI: 10.15372/FTPRPI20210503

Один из факторов, осложняющих добычу твердых полезных ископаемых, — активизация движения свободных подземных вод горными работами, что может приводить к катастрофическим последствиям с человеческими жертвами и остановке горнодобывающих предприятий. При открытом способе разработки увеличение выходных градиентов подземных вод на бортах карьеров ведет к развитию суффозионных явлений в обводненных песках, оползней, обвалов и обрушений в песчано-глинистых и полускальных породах, а в местах залегания глинистых пород — к их пучению [1]. При подземном способе разработки возможно образование внезапных прорывов воды и плывунов, приводящих к затоплению и заилению не только отдельных выработок, участков и горизонтов, но и целых шахт, как это случилось на калийном руднике “Соликамск-2”, на который приходилось 18 % мощности всех добычных активов компании “Уралкалий” [2].

Для горных предприятий со сложной гидрогеологической обстановкой разработаны методики установления границ опасных зон и инструкции по проектированию и ведению в них горных работ, например в угледобывающих шахтах [3]. Однако специалисты отмечают, что руководящие документы не учитывают ряд факторов, в частности техногенные изменения и разрушение породного массива [4], наличие в нем, местоположение и проводимость крупно-размерных каналов (трещин), которые определяют особый характер фильтрации флюидов

в массиве и являются основной предпосылкой прорывов воды в горные выработки [5]. Недостаточность сведений о расположении и параметрах подземных потоков снижает эффективность и безопасность горных работ.

Известный способ дистанционного контроля фильтрационных процессов в ближней зоне эксплуатационных скважин — анализ сейсмоакустических шумов, вызванных взаимодействием текущей жидкости с поверхностью твердого тела или препятствиями [6]. Этот способ широко используют в нефтедобыче для выявления перетоков и работающих интервалов продуктивных пластов за обсадной колонной. Экспериментально установлено, что при движении жидкости в кавернозных и трещиноватых породах возбуждение шума происходит на частотах 100–2000 Гц, в терригенных пористых коллекторах — в полосе 2–20 кГц [6].

Сейсмоакустическая эмиссия протяженных трещин со значительным расходом подземных вод изучена слабо и в горном деле практического применения не получила. Излучение каналов с подвижным флюидом рассматривалось в основном в вулканологии для объяснения механизмов возбуждения и низкочастотного характера вулканического тремора. Типичные спектры таких колебаний содержат несколько выраженных пиков, основной из которых расположен на частотах 0.1–7.0 Гц. Продолжительность колебаний составляет от минут до нескольких дней и месяцев [7–11]. Другим приложением является сейсмический мониторинг подледниковых потоков воды. Регистрируемые сигналы по своим характеристикам схожи с вулканическим тремором, но спектральный пик излучения приходится на частоты 3–11 Гц [12–14]. Гармонический характер наблюдаемого излучения объясняют резонансными колебаниями подледных трещин и каналов, заполненных водой.

Еще более высокой частотой обладает сейсмический шум, вызванный нагнетанием жидкости при гидроразрыве пластов. В [15] показано, что в процессе роста трещины частота основного спектрального пика упругих колебаний снижается до 25–15 Гц. В ходе выполнения разрывов зарегистрировано излучение периодических сейсмических сигналов на частотах 8–11 Гц и выше [16]. Наиболее вероятной его причиной считают поток жидкости в трещине, раскрытой внутренним давлением. В [17–19] сообщается о длиннопериодных событиях большой продолжительности (LPLD-события), регистрируемых при гидроразрыве пласта. Они наблюдаются как во время формирования трещины, так и после ее создания. Для LPLD-событий характерны низкоамплитудные цуги колебаний продолжительностью 10–100 с в полосе частот 10–80 Гц с равномерной спектральной плотностью в области низких частот и постепенным ее снижением в сторону высоких частот. Подобные колебания обнаружены и авторами настоящей статьи при проведении тестовых гидроразрывов оргстекла [20]. В ходе лабораторных экспериментов зарегистрированы LPLD-события продолжительностью 10–11 секунд с основным пиком спектральной плотности в полосе частот 15–18 Гц, схожие по форме колебаний с вулканическим тремором [20].

Результаты известных исследований показывают, что потоки воды в протяженных трещинах, представляющие основную опасность при подземной разработке полезных ископаемых, генерируют упругие колебания с частотой ниже, чем у сейсмоакустической эмиссии, вызванной фильтрацией пластовых флюидов в пористых и трещиноватых породах. Это позволяет надеяться на относительную простоту выделения соответствующих сигналов на фоне повышенного микросейсмического шума в шахтных условиях.

Исследование сейсмического излучения трещин с потоком флюида, установление связей между частотой колебаний, расходом жидкости и геометрическими размерами каналов представляет практический интерес в задачах заблаговременного обнаружения зон интенсивной фильтрации подземных вод, повышения технико-экономической эффективности и безопасно-

сти разработки твердых полезных ископаемых в сложных гидрогеологических условиях. В настоящей статье приведены результаты численных и натурных исследований изучения упругих колебаний водопроводящими трещинами, обсуждаются вопросы дистанционного контроля параметров потока по регистрируемому излучению.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕЩИН С ПОТОКОМ ФЛЮИДА

Известные подходы к моделированию сейсмического излучения разрывов при течении в них флюидов можно разделить на две группы, одна из которых сосредоточена на колебаниях, возбуждаемых при резком раскрытии (росте) трещины, наполненной жидкостью [7, 8, 21–23]. В другой группе изучаются колебания стенок трещины, возникающие под действием постоянно протекающего в ней флюида [10, 24, 25], что больше соответствует рассматриваемой задаче. Простая двумерная модель, предложенная в [10], представляет собой открытую систему с сосредоточенными параметрами, в которой слой жидкости расположен между двумя стенками 1, 2 (рис. 1). Поток жидкости направлен вдоль оси x . Его взаимодействие с вмещающей упругой средой приводит к колебаниям давления жидкости и раскрытия трещины $h(t)$. Предполагается, что область колебаний $h(t)$ ограничена прямоугольной площадкой размерами L на W , в пределах которой смещения стенки вдоль y одинаковы по амплитуде и фазе.

При некоторых пороговых значениях параметров взаимодействие потока жидкости и берегов трещины приводит к возникновению устойчивых автоколебаний. Результаты численных расчетов согласуются с экспериментальными данными, что свидетельствует в пользу автоколебательного механизма генерирования сейсмических волн потоком флюида [10]. В указанной модели рассматривается трещина длиной L вдоль направления потока, расположенная в вязкоупругой среде, упругость которой задается коэффициентом жесткости k , а внутреннее трение — коэффициентом поглощения A (рис. 1). Предполагается, что в истоке и стоке жидкости на концах трещины давления постоянны и равны соответственно p_1 и p_2 , а раскрытие трещины h зависит только от времени t . Система уравнений, описывающая движение жидкости в трещине и изменение ее раскрытия (колебания стенок), имеет вид [10]

$$\begin{cases} \left[M + \frac{\rho L^3}{12h} \right] \ddot{h} + \left[A + \frac{L^3}{12h} \left(\frac{12\eta}{h^2} - \frac{\rho}{2} \frac{\dot{h}}{h} \right) \right] \dot{h} + k(h - h_0) = L \left[\frac{p_1 + p_2}{2} - \frac{\rho v^2}{2} - F_r \right]; \\ \rho v + \frac{12\eta}{h^2} v = \frac{p_1 - p_2}{L}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь h_0 — начальное раскрытие трещины при неподвижном флюиде; ρ , η — соответственно плотность и вязкость жидкости; v — скорость потока; M — присоединенная масса породы; F_r — горное давление, сжимающее трещину; L , W — размеры колебательного участка трещины вдоль и поперек потока жидкости.

Отметим, что использование сосредоточенных параметров k , A и массы M является пространственным подходом в анализе излучения сейсмических источников [26]. С учетом двумерного характера модели (1) значения указанных параметров нормируются на размер W вдоль оси z . Согласно [10], для магматических разломов справедливо $k \approx LG/W$; $M \approx (1/2)\rho L^2$, где G — модуль сдвига среды. Следует, однако, учесть, что формы интрузивных даек и водопроводящих трещин, а также физические свойства заполняющих их флюидов значительно отличаются друг от друга. Для даек характерное соотношение L/W составляет $10^{-1} - 10^{-2}$, раскрытие $h_0 \sim 1$ м, вязкость и плотность флюида — соответственно около

500 Па·с и 2500 кг/м³ [10]. Для прорывов подземных вод более реалистичны значения $L/W \approx 1$ и выше, а вязкость и плотность жидкости составляют 1 мПа·с и 1000 кг/м³. В случае $L/W = 1$ значения сосредоточенных параметров можно оценить из известного решения задачи излучения упругих волн жестким штампом [26, 27]. Разделив оценки искомых параметров, полученные в [26], на $W=L$, имеем $k \approx 2G/(2-\mu)$; $M \approx \alpha_M \rho L^2 [16(2-\mu)]$; $A \approx 7\alpha_A L / [8(2-\mu)] \sqrt{\rho G}$, где μ — коэффициент Пуассона среды; α_M, α_A — близкие к единице коэффициенты, зависящие от μ и частоты излучаемого сигнала [26]. Коэффициент k при $L/W = 1$ зависит только от свойств среды. Другие параметры — присоединенная масса M и коэффициент поглощения A — увеличиваются с ростом L . Для большинства горных пород $k \approx 10 - 100$ ГПа, $M \approx (50 - 100) \cdot L^2$ кг/м, $A \approx (0.1 - 1.0) \cdot L$ ГПа·с/м.

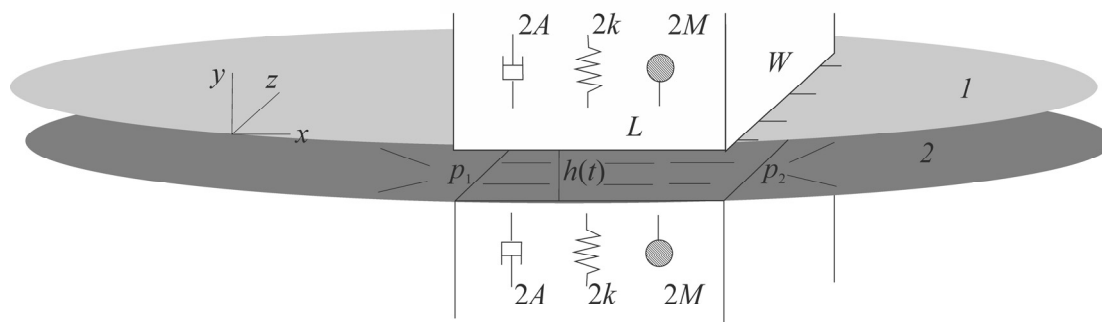


Рис. 1. Модель возбуждения колебаний стенок трещины

Необходимое условие течения жидкости — поддержание трещины в раскрытом состоянии внутренним давлением, что выполняется при $kh_0 + L[(p_1 + p_2)/2 - F_r] > 0$. Если трещина исходно закрыта ($h_0 = 0$), то приведенное неравенство сводится к очевидному условию $(p_1 + p_2)/2 > F_r$, выполнение которого в породном массиве вне зоны техногенного влияния маловероятно. Горные работы способствуют локальной разгрузке пород от напряжений, т. е. уменьшению F_r вплоть до появления раскрытых трещин ($h_0 > 0$). Именно в таких зонах возможно возникновение как стабильных потоков с постоянными значениями раскрытия h_s и скорости v_s , соответствующих стационарному решению (1) при $\dot{h}, \ddot{h}, \dot{v} \equiv 0$, так и неустойчивого течения с колебаниями берегов. Условие возбуждения автоколебаний можно найти путем линеаризации системы (1) и решения получаемых обыкновенных дифференциальных уравнений при малых вариациях δh и δv относительно h_s и v_s . Не останавливаясь на этом вопросе подробно, отметим, что неустойчивость решения возникает при определенных сочетаниях значений $\rho, \eta, L, k, M, A, h_s$ и v_s , причем частота автоколебаний нелинейно зависит от их амплитуды [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Система уравнений (1) решалась методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Анализ численных результатов показывает, что параметры модели нелинейно влияют не только на возбуждение и амплитудно-частотную характеристику колебаний, но и на их устойчивость. Могут возникать как гармонические, так и непрерывные хаотические колебания [28], последовательности импульсных сигналов. Для распространенных горных пород и значений $L, \Delta p = p_1 - p_2, h_0, F_r$, свойственных опасным по гидродинамической обстановке зонам, решение (1) дает либо стабильное течение жидкости ($h = h_s = \text{const}$), либо гармонические низкочастотные колебания

берегов. Примеры колебаний и их фазовых траекторий в случае переходного процесса в виде затухающей синусоиды с последующей стабилизацией потока и при возникновении гармонических автоколебаний приведены на рис. 2 и 3.

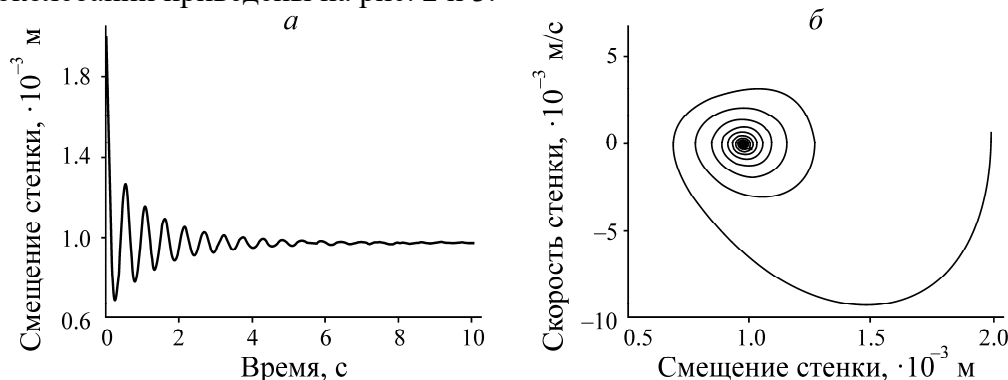


Рис. 2. Форма (а) и фазовая траектория (б) затухающих колебаний стенки трещины длиной $L=10$ м с выходом на установившийся поток воды при $\Delta p=3$ МПа, $h_0=1$ мм, $F_r=10$ МПа, $G=40$ ГПа, $\mu=0.3$, $\rho=2300$ кг/м³

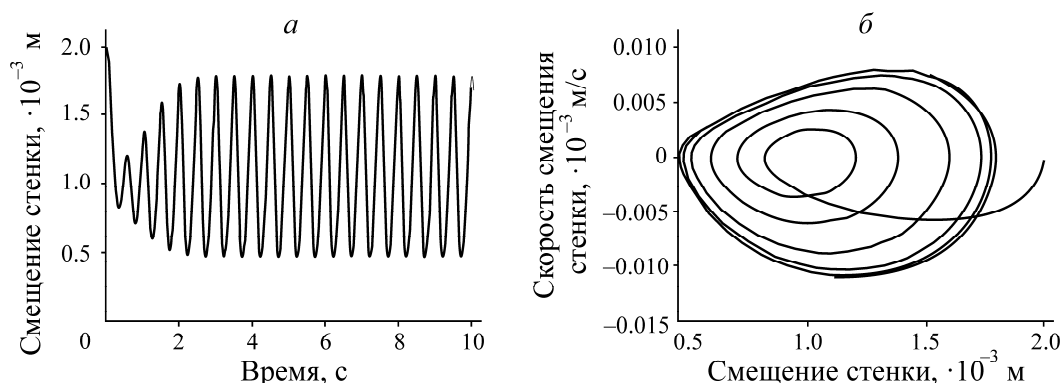


Рис. 3. Форма (а) и фазовая траектория (б) устойчивых автоколебаний стенки трещины длиной $L=10$ м при $\Delta p=5$ МПа, $h_0=1$ мм, $F_r=10$ МПа, $G=40$ ГПа, $\mu=0.3$, $\rho=2300$ кг/м³

Отметим, что поток жидкости через систему связанных трещин или их участков с отличающимися геометрическими параметрами L , h_0 может генерировать цуги колебаний и последовательности затухающих импульсов, но этот вопрос требует дальнейшего изучения.

На рис. 4 приведены примеры расчетных диаграмм зависимости амплитуды h_1 и частоты f_1 первой гармоники установившихся автоколебаний стенки трещин длиной $L=1$; 5; 10; 50 м от раскрытия $h_0 \in [0; 0.003]$ м и перепада давления воды $\Delta p \in [0; 10]$ МПа, рассчитанных при $\mu=0.3$, $G=40$ ГПа, $\rho=2300$ кг/м³ (песчаники, известняки), $F_r=10$ МПа и $p_2=0.1$ МПа. Видно, что даже короткие трещины длиной 1 м генерируют колебания частотой не более 50 Гц. Увеличение размеров приводит к сильному снижению частоты первой гармоники, которая уже при $L=30-50$ м составляет десятые — сотые доли герца (рис. 5а), т. е. длина объемных волн в среде, генерируемых потоком воды в трещине, на несколько порядков больше самого излучателя.

Частота колебаний в исследованном диапазоне параметров практически не зависит от свойств пород (рис. 5а) и значений h_0 и Δp (рис. 4б). Основным фактором, определяющим период возникающих автоколебаний, является длина трещины.

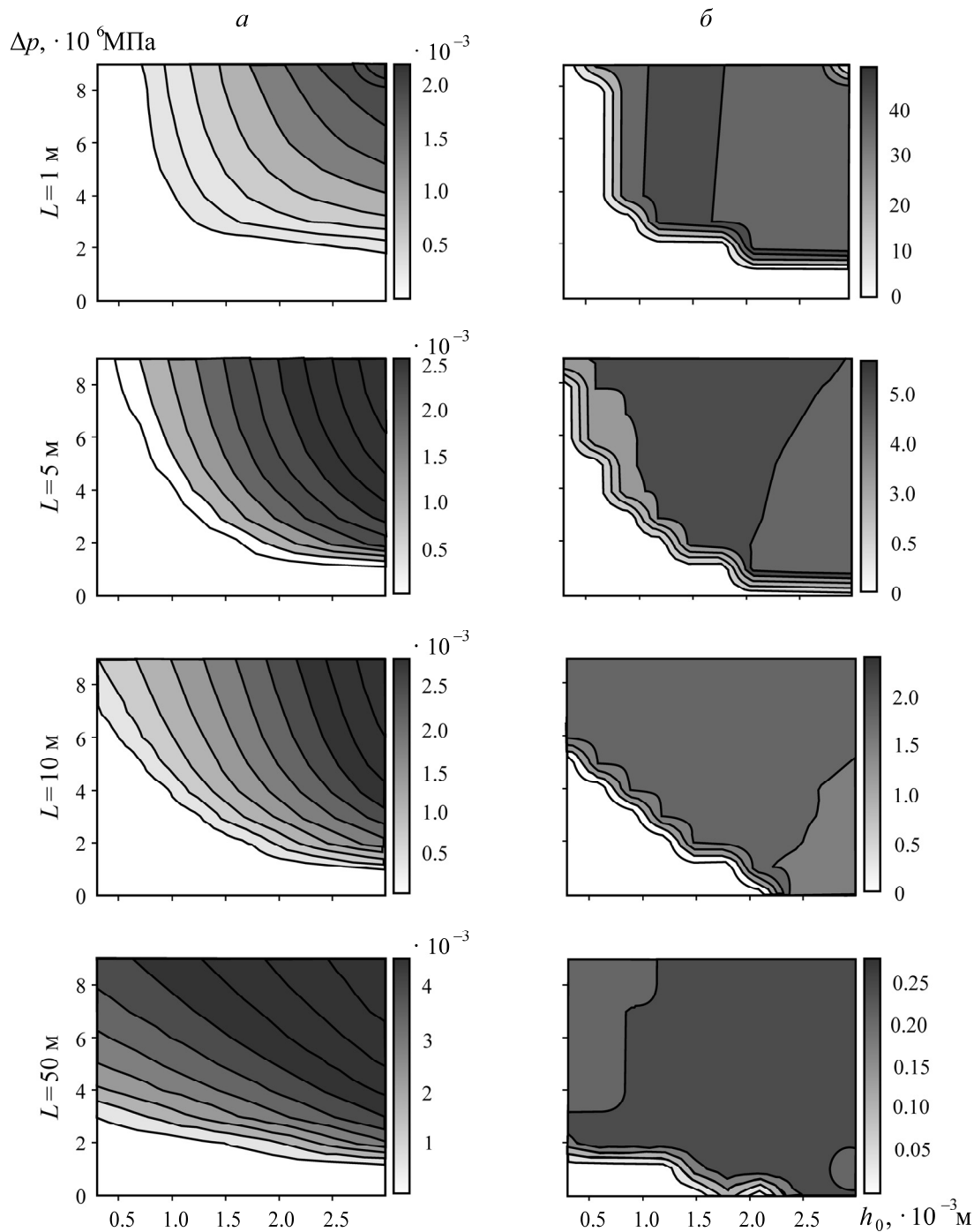


Рис. 4. Амплитуда (а) и частота (б) первой гармоники колебаний стенки трещин длиной $L=1, 5, 10, 50$ м от раскрытия h_0 и перепада давления воды Δp при $\mu=0.3$, $G=40$ ГПа; $\rho=2300$ кг/м³, $F_r=10$ МПа и $p_2=0.1$ МПа

Из приведенных на рис. 4а диаграмм следует, что при начальном раскрытии $h_0 > 1-2$ мм и прочих равных параметрах порог возбуждения автоколебаний по перепаду давления Δp слабо зависит от длины трещины и составляет ≈ 2 МПа. При меньших раскрытиях неустойчивость потока в длинных трещинах наступает при меньших значениях Δp , чем в коротких. В рассматриваемых примерах автоколебания могут возбуждаться, даже когда $h_0=0$ — в трещинах длиной 10 и 50 при градиентах давления в потоке 0.14–0.3 МПа/м.

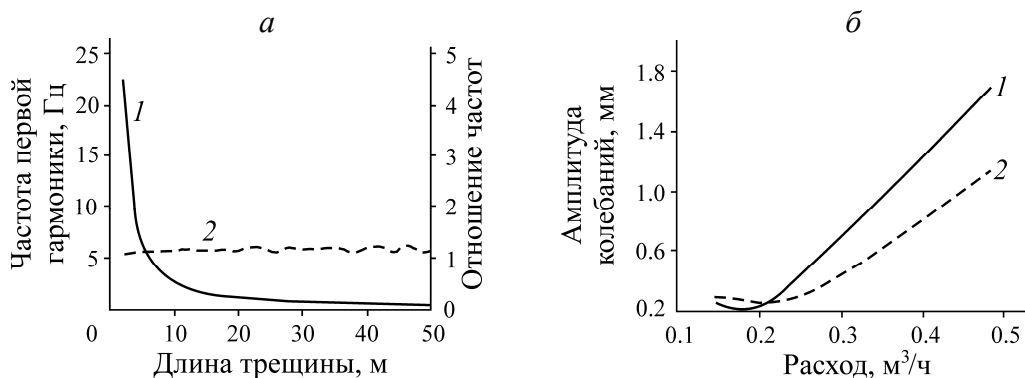


Рис. 5. Зависимость частоты и амплитуды первой гармоники колебаний стенки трещины от ее длины (а) и среднего расхода воды (б) при $\Delta p = 5$ МПа, $h_0 = 1$ мм, $F_r = 10$ МПа: 1 — влажный уголь ($\mu = 0.15$, $G = 30$ ГПа, $\rho = 1400$ кг/м³); 2 — песчаник ($\mu = 0.3$, $G = 40$ ГПа, $\rho = 2300$ кг/м³)

Амплитуда смещения стенок сложным образом зависит от сочетания параметров h_0 и Δp . Так, для длинной трещины $L = 50$ м доминирующим фактором является перепад давления, для более коротких при $\Delta p > 6$ МПа — начальное раскрытие h_0 (рис. 4а). Значения h и Δp определяют расход жидкости в трещинах, который в случае плоского ламинарного потока дается выражением $(1/12\eta)h^3\Delta p$. На рис. 5б представлена зависимость амплитуды первой гармоники колебаний стенок трещины длиной 10 м от среднего расхода Q , рассчитанного при $h = h_s$, где h_s — стационарное решение (1). Численные оценки показывают, что в исследованном диапазоне параметров амплитуда колебаний берегов трещин с ростом среднего расхода воды увеличивается от 0.02–0.4 мм вблизи порога возбуждения до нескольких миллиметров. При расходе более 0.25 м³/ч эта зависимость приобретает линейный характер (рис. 4а, 5б). При этом амплитуда автоколебаний слабо зависит от L (рис. 4а).

На рис. 6 приведены формы и спектры колебаний стенок двух одинаковых трещин, одна из которых расположена в песчаниках ($\mu \approx 0.3$, $G \approx 40$ ГПа, $\rho \approx 2300$ кг/м³), другая — во влажных углях ($\mu \approx 0.15$, $G \approx 30$ ГПа, $\rho \approx 1400$ кг/м³).

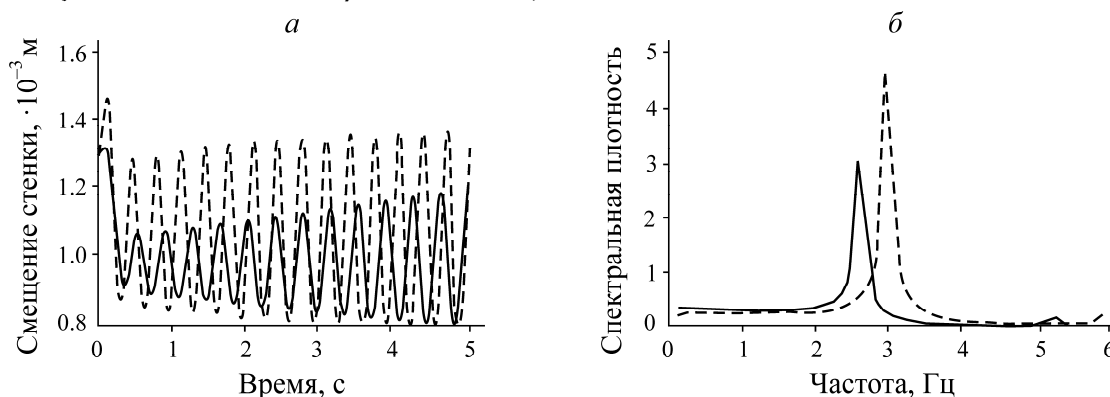


Рис. 6. Форма (а) и амплитудный спектр (б) колебаний стенки трещины длиной $L = 10$ м при $\Delta p = 5$ МПа, $h_0 = 1$ мм, $F_r = 10$ МПа в зависимости от свойств среды: сплошная линия: $G = 40$ ГПа, $\mu = 0.3$, $\rho = 2300$ кг/м³; штриховая линия: $G = 30$ ГПа, $\mu = 0.15$, $\rho = 1400$ кг/м³

Видно, что амплитуда смещения стенок трещины в более мягкой и менее плотной породе (влажный уголь) выше (рис. 7а), что согласуется с известным фактом низкой эффективности излучения сейсмических источников в плотных породах, для которых характерны

высокие значения скоростей распространения сейсмических волн. Частоты возбуждаемых автоколебаний в разных породах при прочих равных условиях отличаются менее существенно (рис. 6б).

Итак, результаты численных исследований показывают, что основными факторами, определяющими амплитуду автоколебаний стенки трещины, генерируемых водным потоком в ней, является расход воды и упругие свойства среды, а частоту излучения — длина трещины.

Чтобы оценить возможность дистанционного наблюдения излучаемых сигналов и определения параметров фильтрационного потока, рассмотрим особенности затухания упругих колебаний. Известно, что коэффициент поглощения объемных сейсмических волн в осадочных и магматических породах составляет около 0.15 дБ на длину волны, т.е. поглощением низкочастотного сейсмического излучения средой в масштабе горнодобывающего предприятия можно пренебречь. Тогда основными причинами уменьшения амплитуды колебаний с расстоянием будут геометрическое расхождение волнового фронта и перетоки энергии между зонами сжатия и растяжения, возникающими в ближней зоне излучения трещины, относящейся к сейсмическим источникам “распорного” типа [26], в которых пара равных по величине сил действует в противоположных направлениях. Вблизи источников этого типа падение амплитуды сигнала с расстоянием r описывается сложной функцией, содержащей слагаемые, обратно пропорциональные r в степенях от первой до четвертой [26, 29]. Для расчета сейсмического излучения исходя из заданных колебаний стенки излучателя необходимо определить эту зависимость, что является сложной динамической задачей, решение которой выходит за рамки настоящей статьи.

Воспользуемся более простым подходом, основанным на оценке снизу амплитуды основного тона колебаний x_1 с помощью известной формулы для дальней зоны излучения “распорных” источников в направлении действия вибротяговой силы [26] $x_1 \geq \pi / 16 \cdot f_1 L^3 / (G V_p r) F / S$, где $L/2$ — радиус излучателя; V_p — скорость продольных волн в среде; F — вибротяговая сила, действующая на стенку трещины площадью $S = L^2$. С учетом упругого характера реакции породного массива на переменное воздействие (реактивное сопротивление превалирует) амплитуду силы запишем через закон Гука $F \approx 2GL(2 - \mu)h_1$. В итоге получим следующее выражение: $x_1 \geq \pi / 8 \cdot f_1 L^2 / V_p (2 - \mu)h_1 / r$, где значения h_1 , f_1 берутся из решения (1). Если $h_1 = 200$ мкм, то для $L = 5$ и 50 м в массиве песчаников ($V_p \approx 3200$ м/с) получаем следующие значения x_1 : на удалении 100 м — 32 и 36 нм, на удалении 500 м — соответственно 6.5 и 7.2 нм. Приведенные оценки показывают, что излучение, возбуждаемое интенсивным течением воды в трещинах, вполне доступно для сейсмометрических наблюдений в масштабах рудника, причем более заметными на сейсмограммах будут низкочастотные сигналы от длинных фильтрационных каналов — наиболее опасных при подземной разработке месторождений.

Для оперативного обнаружения водных потоков в шахтных условиях может быть использована любая переносная сейсмическая станция искровзрывобезопасного исполнения в комплекте с инфранизкочастотным геофоном, например сейсмометром СМЕ-6211 (изготовитель R-sensors, Россия), обладающим частотным диапазоном $0.008 - 50$ Гц и чувствительностью 2000 В/(м·с). Если горнодобывающее предприятие оснащено рассредоточенной системой сейсмических наблюдений [30], возможна организация непрерывного микросейсмического мониторинга гидродинамических процессов и их пространственная локализация с применением наземных и подземных приемных антенн, различных алгоритмов выделения целевых сигналов, рассмотренных в работах [31–34].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Натурные исследования сейсмического излучения, генерируемого потоком воды в трещине, выполнены в массиве, сложенном диоритами ($G \approx 40$ ГПа, $\mu \approx 0.1$, $\rho \approx 2800$ кг/м³). Эксперименты проводились в рамках создания мощного скважинно-щелевого подземного сейсмического источника “распорного” типа [35], представляющего собой несколько параллельных скважин, пробуренных в горизонтальной плоскости. В каждую скважину устанавливались силовые элементы, создающие под действием внутреннего давления $P_w = P_0 + P(t)$ переменное растяжение контура скважин в вертикальном направлении (t — время) (рис. 7).

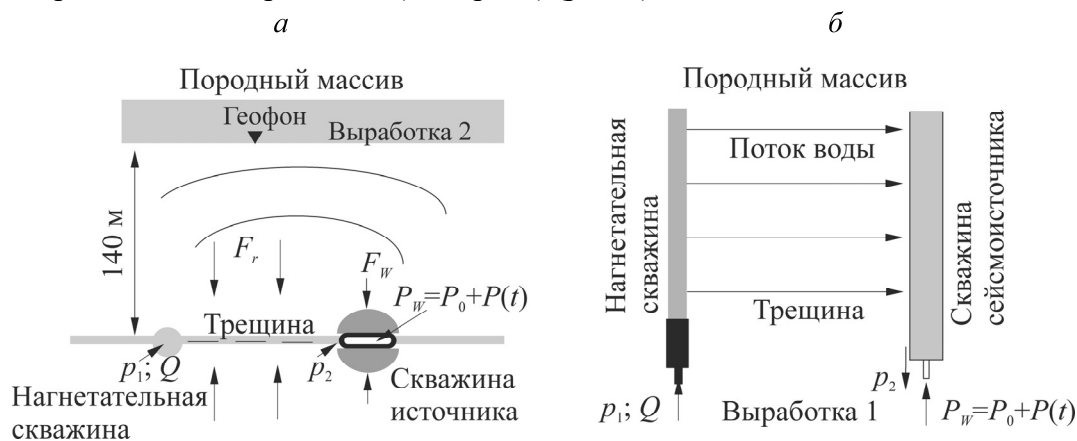


Рис. 7. Схема натурального эксперимента: а — вертикальный разрез; б — план

На удалении 0.9 м по горизонтали от крайней скважины источника пробурена параллельная скважина, в которой проведен гидроразрыв, соединивший скважины трещиной. В процессе выполнения работ зарегистрировано давление запирания разрыва $P_s = 4.9$ МПа. Исследовалось сейсмическое излучение, возникающее при работе источника и одновременной прокачке через трещину воды с перепадом давления $\Delta p = 10.5$ МПа. Наблюдение излучаемого сигнала выполнялось геофоном (собственная частота 1 Гц, чувствительность 155 В/(м/с)), установленным в выработке вышележащего горизонта на удалении 140 м от источника.

На рис. 8 представлена запись выходного сигнала геофона при работе источника на частоте $f_w = 1$ Гц. Несущая частота, генерируемая интенсивным потоком воды в короткой трещине ($L = 0.9$ м), составила 50–60 Гц. Отчетливо видна амплитудная модуляция излучения трещины низкочастотным источником.

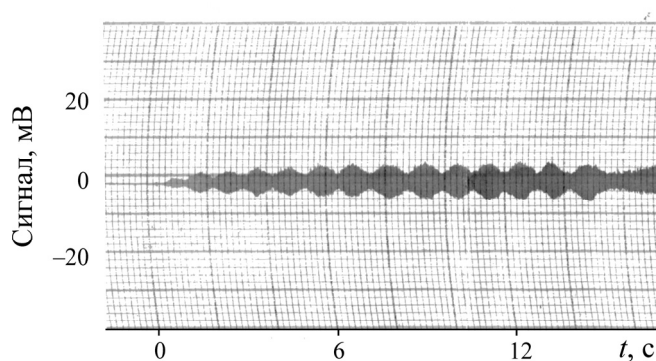


Рис. 8. Выходной сигнал геофона на удалении 140 м от источника при $\Delta p = 10.5$ МПа, $f_w = 1$ Гц

Влияние скважинного источника на колебания берегов трещины может быть учтено в (1) вводом дополнительного переменного слагаемого либо в F_r , либо в h_0 , что для решения (1) равнозначно. На рис. 9 приведены результаты расчета формы, фазовой траектории и спектра автоколебаний стенки трещины длиной 0.9 м, модулированных по F_r гармоническим сигналом частотой $f_w = 1$ Гц и амплитудой $F_r/2$, т.е. сжатие трещины в (1) задано суммой вида $F_r + F_r/2 \sin(2\pi f_w t)$.

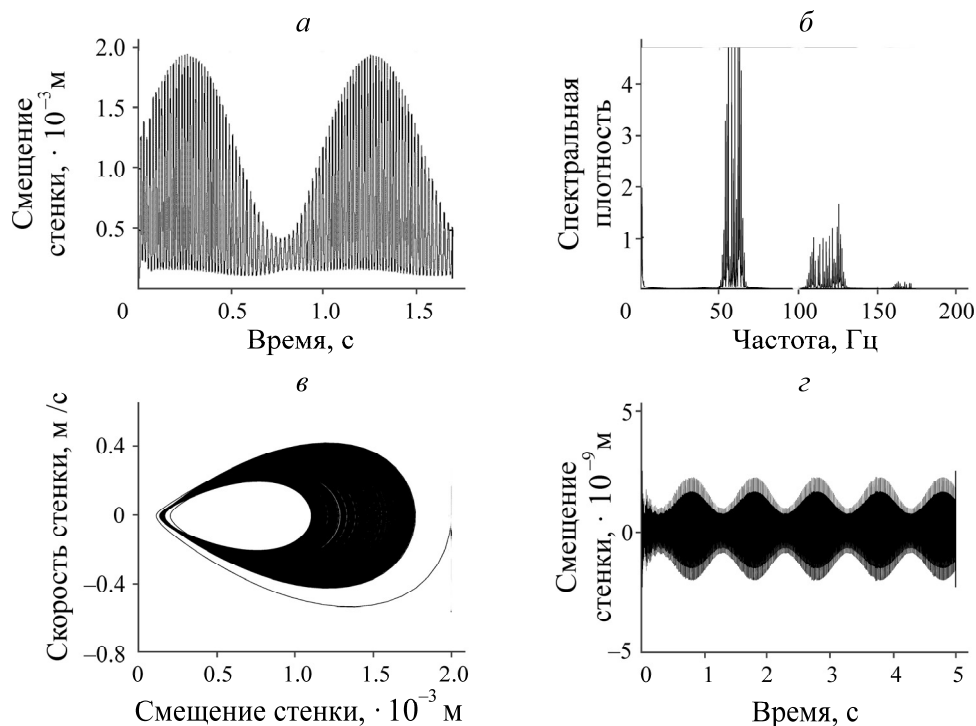


Рис. 9. Расчетные форма (а), спектр (б) и фазовая траектория (в) колебаний стенки трещины, сейсмический сигнал (г) на удалении 140 м при $L=0.9$ м, $\Delta p=10.5$ МПа, $h_0=1$ мм, $F_r=P_s=4.9$ МПа, $G=40$ ГПа, $\mu=0.1$, $\rho=2800$ кг/м³, $f_w=1$ Гц

Из рис. 9а видно, что колебания, генерируемые потоком в трещине, глубоко модулированы по амплитуде гармоническим сигналом источника. Энергия колебаний сосредоточена в диапазонах частот 55–70 Гц (основной тон) и 120–130 Гц (вторая гармоника) (рис. 9б). Колебания нестабильны, что отчетливо прослеживается по фазовой картине, демонстрирующей множественность траекторий (рис. 9в). Причиной этого является высокая интенсивность потока (большой перепад давления Δp в короткой трещине) и связанное с этим хаотическое поведение системы (1).

На рис. 9г приведен расчетный сейсмический сигнал на выходе геофона, удаленного на 140 м от трещины, колебания стенки которой показаны на рис. 9а. При расчете сигнала учитывались его ослабление средой и передаточная характеристика сейсмоприемника. Сравнение сейсмограмм на рис. 9г и рис. 8 показывает, что формы сигналов в численном и натурном экспериментах практически совпадают. Нижняя расчетная оценка амплитуды составляет ≥ 2.4 нм, т.е. того же порядка, что и значение, полученное в породном массиве (9.6 нм) [35].

Результаты проведенных исследований подтверждают возникновение автоколебаний стенок трещины при прокачке через нее жидкости и возможность дистанционного обнаружения сейсмического излучения в подземных условиях, определения длины и расхода водопроводящих трещин по амплитудно-частотной характеристике регистрируемых колебаний.

ВЫВОДЫ

Экспериментально доказана возможность дистанционного обнаружения интенсивных фильтрационных потоков в трещинах по генерируемому ими сейсмическому излучению. Показано, что частота автоколебаний, генерируемых потоком воды в трещинах, определяется в основном длиной проводящего канала, а амплитуда — расходом и свойствами вмещающих пород. Результаты численных расчетов согласуются с экспериментальными данными. По амплитудно-частотной характеристике регистрируемых колебаний можно оценивать длину и расход водопроводящих трещин, местоположение которых заранее известно или определено методами эмиссионной томографии.

Амплитуда смещения стенок трещины выше в более мягких и менее плотных породах. Частоты возбуждаемых автоколебаний в разных породах при прочих равных условиях отличаются менее существенно. Длина объемных волн в среде, генерируемых потоком воды в трещине, на один-два порядка больше самого излучателя. Частотный диапазон возбуждаемых сигналов ниже, чем у сейсмоакустической эмиссии, вызванной фильтрацией пластовых флюидов в пористых и трещиноватых породах, что обеспечивает возможность их выделения на фоне повышенного микросейсмического шума в условиях действующего горнодобывающего предприятия.

Для оперативного обнаружения водных потоков в подземных условиях может быть использована штатная система сейсмического мониторинга горнодобывающего производства, дооснащенная геофонами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горная энциклопедия.** Подземные воды. — М.: Сов. энцикл., 1989. — Т. 4. — 623 с.
2. **Заглянуть в провал:** что происходит на месте аварии “Уралкалия”. URL: <http://www.rbc.ru/business/24/11/2014/5472f367cbb20f47fd664aa1> (дата обращения: 06.06.2021).
3. **Инструкция** по безопасному ведению горных работ у затопленных выработок / А. И. Субботин, В. В. Грицков, М. Г. Козаченко, О. А. Коняхина // Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль: сб. документов. — Вып. 8. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010.
4. **Одинцев В. Н., Милитенко Н. А.** Прорыв воды в горные выработки как следствие самопроизвольного гидроразрыва массива пород // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 3–16.
5. **Куликова Е. Ю.** Предпосылки прорыва подземных и поверхностных вод в горные выработки // ГИАБ. — 1996. — № 6. — С. 109–113.
6. **Марфин Е. А.** Скважинная шумометрия и виброакустическое воздействие на флюидонасыщенные пласты: учеб.-метод. пособие. — Казань: Изд-во КФУ, 2012. — 44 с.
7. **Aki K., Fehler M., and Das S.** Source mechanism of volcanic tremor: Fluid-driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption, *J. Volcanology and Geothermal Res.*, 1977, Vol. 2, No. 3. — P. 259–287.
8. **Chouet B.** Dynamics of a fluid-driven crack in three dimensions by the finite difference method, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1986, Vol. 91, No. B14. — P. 13967–13992.
9. **Balmforth N. J., Craster R. V., and Rust A. C.** Instability in flow through elastic conduits and volcanic tremor, *J. Fluid Mech.*, 2005, Vol. 527. — P. 353–377.
10. **Julian B. R.** Volcanic tremor: nonlinear excitation by fluid flow, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1994, Vol. 99, No. B6. — P. 11859–11877.

11. **Corona-Romero P., Arciniega-Ceballos A., and Sánchez-Sesma F. J.** Simulation of LP seismic signals modeling the fluid–rock dynamic interaction, *J. Volcanology and Geothermal Res.*, 2012, Vol. 211. — P. 92–111.
12. **Winberry J. P., Anandakrishnan S., and Alley R. B.** Seismic observations of transient subglacial water-flow beneath MacAyeal ice stream, West Antarctica, *Geophys. Res. Let.*, 2009, Vol. 36. — L11502.
13. **Lawrence W. S. T. and Qamar A.** Hydraulic transients: A seismic source in volcanoes and glaciers, *Sci.*, 1979, Vol. 203, No. 4381. — P. 654–656.
14. **Röösli C., Walter F., Husen S., Andrews L., Lüthi M., Catania G. and Kissling E.** Sustained seismic tremors and ice quakes detected in the ablation zone of the Greenland ice sheet, *J. Glaciology*, 2014, Vol. 60, No 221 — P. 563–575.
15. **Potter R. M. and Dennis B. R.** Seismic and fluid pressure response from a series of hydraulic fractures in granite, *Transactions-American Geophys. Union*, 2000 Florida ave NW, Washington, dc 20009: Amer Geophys. Union, 1974, Vol. 55, No. 4. — P. 430–430.
16. **Tary J. B., Baan M., and Eaton D. W.** Interpretation of resonance frequencies recorded during hydraulic fracturing treatments, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2014, Vol. 119, No. 2. — P. 1295–1315.
17. **Das I. and Zoback M. D.** Long-period, long-duration seismic events during hydraulic stimulation of shale and tight-gas reservoirs. Part 1: Waveform Characteristics, *Geophysics*, 2013, Vol. 78, No. 6. — P. KS97-KS108.
18. **Das I. and Zoback M. D.** Long-period, long-duration seismic events during hydraulic fracture stimulation of a shale gas reservoir, *The Leading Edge*, 2011, Vol. 30, No. 7. — P. 778–786.
19. **Eaton D., Baan M., Tary J., Birkelo B., Spriggs N., Cutten S. and Pike K.** Broadband microseismic observations from a Montney hydraulic fracture treatment, Northeastern BC, Canada, *CSEG Recorder*, 2013, Vol. 38, No. 3 — P. 44–53.
20. **Сердюков С. В., Курленя М. В., Патутин А. В., Рыбалкин Л. А., Шилова Т. В.** Экспериментальная проверка способа направленного гидроразрыва горных пород // ФТПРПИ. — 2016. — № 4. — С. 3–11.
21. **Chouet B. and Julian B. R.** Dynamics of an expanding fluid-filled crack, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 1985, Vol. 90, No. B13. — P. 11187–11198.
22. **Yamamoto M. and Kawakatsu H.** An efficient method to compute the dynamic response of a fluid-filled crack, *Geophys. J. Int.*, 2008, Vol. 174, No. 3. — P. 1174–1186.
23. **Frehner M. and Schmalholz S. M.** Finite-element simulations of Stoneley guided-wave reflection and scattering at the tips of fluid-filled fractures, *Geophysics*, 2010, Vol. 75, No. 2. — P. T23–T36.
24. **Balmforth N. J., Craster R. V., and Rust A. C.** Instability in flow through elastic conduits and volcanic tremor, *J. Fluid Mech.*, 2005, Vol. 527. — P. 353–377.
25. **Rust A.** Flow-induced oscillations: A source mechanism for volcanic tremor?, *Course Lectures “Conceptual models of the climate 2003. Program of Study: Non-Newtonian Geophys. Fluid Dynamics”*, Woods Hole Oceanog. Inst. Tech. Rept., WHOI-2004-03, 2004. — P. 113–132.
26. **Чичинин И. С.** Вибрационное излучение сейсмических волн. — М.: Недра, 1984. — 224 с.
27. **Бородачев Н. М.** Динамическая контактная задача для штампа с плоским круглым основанием, лежащего на упругом полупространстве // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. — 1964. — № 2. — С. 82–90.

28. Азаров А. В., Сердюков С. В., Чечурова Р. Д. Возбуждение сейсмических волн при движении жидкости в трещине массива горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2017. — Т. 4. — № 3. — С. 5–10.
29. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы: пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — Т. I. — 520 с.
30. Сердюков С. В., Азаров А. В., Дергач П. А., Дучков А. А. Аппаратные решения микросейсмического мониторинга геодинамических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 192–200.
31. Курленя М. В., Сердюков А. С., Азаров А. В., Никитин А. А. Численное моделирование волновых полей от микросейсмических событий при подземной добыче полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 61–69.
32. Логинов Г. Н., Яскевич С. В., Дучков А. А., Сердюков А. С. Совместная обработка данных поверхностных и подземных систем микросейсмического мониторинга при добыче твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 100–107.
33. Azarov A. V., Serdyukov A. S., and Gapeev D. N. Frequency domain orthogonal projection filtration of surface microseismic monitoring data, Geophys. Prosp., 2020, Vol. 68. — P. 382–392.
34. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. A., and Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data, Geophysics, 2019, Vol. 84, No. 1. — P. A19-A24.
35. Сердюков С. В. Экспериментальное обоснование вибросейсмической технологии добычи нефти: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2001. — 282 с.

Поступила в редакцию 28/VI 2021

После доработки 26/VIII 2021

Принята к публикации 10/IX 2021