



УДК 550.348.432

В. В. Сказка, С. В. Сердюков, А. С. Сердюков

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ПОРОДНЫХ МАССИВОВ БЛОЧНОГО СТРОЕНИЯ

Предложена модель микросейсмического шума в горных породах блочного строения. Приведены результаты численных исследований формы сигналов и спектрального состава микросейсмического шума продуктивных пластов блочного строения, зависимость радиуса корреляции среднечастотных микросейсмиков от положения приемников по отношению к пласту, генерирующему шум. Даны рекомендации по алгоритмам выделения полезного сигнала и локации эндогенных сейсмических событий на основе решения обратных кинематических задач.

The model of microseismic noise in block structuring rocks is offered. Results of numerical researches of the signal form and spectral structure of microseismic noise in productive block structuring layers, dependence of the correlation radius of mid-frequency noise on the receivers position in relation to a layer generating noise are resulted. Recommendations about algorithms of the useful signal allocation and a location of internal seismic events on the basis of the inverse kinematic problems decision are made.

Ключевые слова: массив горных пород, блочная среда, микросейсмический шум.

Key words: rock massif, block media, microseismic noise.

Введение

Для породных массивов характерны дислокации различных масштабов. Их система задает блочное строение геологической среды [1], особенности ее деформирования и выделения упругой энергии в виде эндогенного микросейсмического излучения [2; 3].

Сейсмические методы исследования продуктивных пластов предусматривают выделение полезных сигналов на фоне помех, связанных с релаксацией блочной среды к равновесному состоянию, нарушенному процессом разработки [4]. В ряде случаев, например для карбонатных нефтегазовых коллекторов, выраженная система трещин ведет к определенным закономерностям в пространственном распределении источников шума по частотам и энергии [5]. Для решения модельных задач в таких средах необходимо учитывать влияние блочной структуры на характеристики шума. Простые подходы добавления к сигналу случайных помех не применимы.

В статье рассмотрена модель микросейсмического шума, учитывающая блочное строение массива горных пород.



1. Модель микросейсмического события

Пусть микросейсмическое событие генерируется разрывом смещений вдоль поверхности площадью A , нормаль к которой задана единичным вектором \vec{v} . Скачок смещений \vec{w} параллелен плоскости разрыва. Площадка находится в точке с координатами $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$. Прием сейсмического сигнала производят в точке $x = (x_1, x_2, x_3)$. Введем следующие обозначения: $r = |x - \xi|$ – расстояние от источника до приемника; $\vec{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$, $\gamma_i = (x_i - \xi_i)/r$; V_p, V_s – скорости распространения соответственно продольных и поперечных волн; μ – коэффициент Ламе; ρ – плотность среды.

Компоненты волнового поля $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$ в однородной среде от микросейсмического события будем вычислять по формуле [6]

$$\begin{aligned}
 u_n = & \left(\frac{30\gamma_n\gamma_p\gamma_qV_q - 6v_n\gamma_p - 6\delta_{np}\gamma_qV_q}{4\pi\rho r^4} \right) \mu A \int_{r/V_p}^{r/V_s} \tau \bar{w}_p(t-\tau) d\tau + \\
 & + \left(\frac{12\gamma_n\gamma_p\gamma_qV_q - 2v_n\gamma_q - 2\delta_{np}\gamma_qV_q}{4\pi\rho V_p^2 r^2} \right) \mu A \bar{w}_p(t - \frac{r}{V_p}) - \\
 & - \left(\frac{12\gamma_n\gamma_p\gamma_qV_q - 3v_n\gamma_p - 3\delta_{np}\gamma_qV_q}{4\pi\rho V_s^2 r^2} \right) \mu A \bar{w}_p(t - \frac{r}{V_s}) + \\
 & + \frac{2\gamma_n\gamma_p\gamma_qV_q}{4\pi\rho V_p^3 r} \mu A \dot{\bar{w}}_p(t - \frac{r}{V_p}) - \\
 & - \left(\frac{2\gamma_n\gamma_p\gamma_qV_q - v_n\gamma_p - \delta_{np}\gamma_qV_q}{4\pi\rho V_s^3 r} \right) \mu A \dot{\bar{w}}_p(t - \frac{r}{V_s}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где t – время; δ_{ij} – символ Кронекера.

Сигнала микросейсмического события зададим импульсом Риккера:

$$f(t) = (1 - 2p^2 t^2) \exp(-p^2 t^2), \tag{2}$$

где p – затухание; $p/\pi = \omega_0$ – доминантная частота упругих колебаний.

Поглощения сигнала средой моделируем функцией:

$$F(r, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\omega) e^{-|\omega|\alpha r} e^{i\omega t} d\omega, \tag{3}$$

где r – расстояние от источника до приемника; α – коэффициент поглощения; $\tilde{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$ – преобразование Фурье исходного сигнала (2); ω – круговая частота колебаний, Гц.

На рисунке 1 показаны графики функций (2) и (3), а также их амплитудные спектры при: $r = 1000$ м, $p = 40\pi$ Гц, $\alpha = 0,15/(2\pi \cdot 2400)$ с/м.

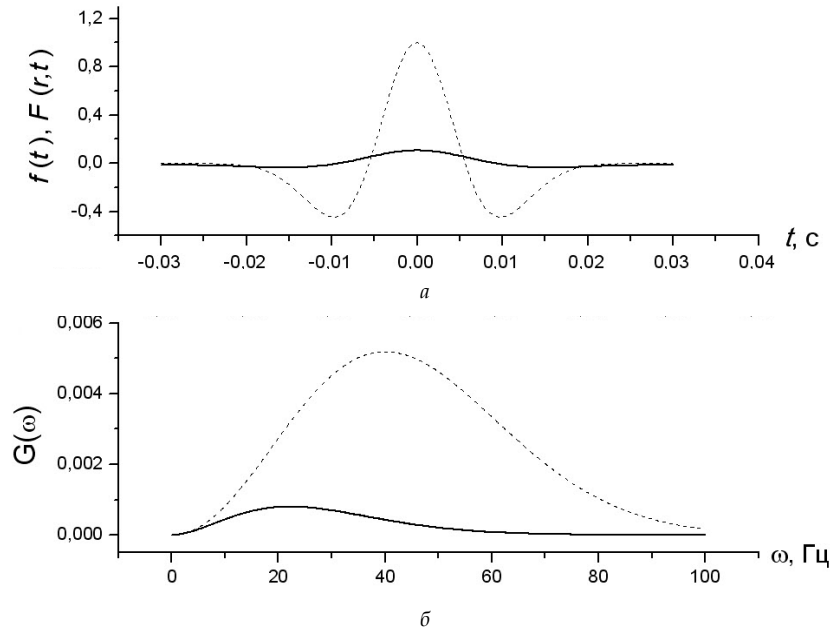


Рис. 1. Форма импульсов (а) и их амплитудные спектры (б):
 --- $f(t)$; - - - $F(r,t)$; $r = 1000$ м

Интеграл (3) выразим в явном виде

$$\begin{aligned}
 F(r,t) = & \left[(-1/8 - 1/4 p^2 r^2 \alpha^2 + 1/4 p^2 t^2 - 1/2 i p^2 r \alpha t) e^{p^2(-t^2 + 2i r \alpha t + r^2 \alpha^2)} \operatorname{erf}(p r \alpha + i p t) + \right. \\
 & + (-1/4 p^2 r^2 \alpha^2 + 1/2 i p^2 r \alpha t + 1/4 p^2 t^2 - 1/8) e^{p^2(-t^2 - 2i r \alpha t + r^2 \alpha^2)} \operatorname{erf}(p r \alpha - i p t) + \\
 & + 1/8 \frac{(-2 p^2 \pi t^2 + 2 p^2 \pi r^2 \alpha^2 + \pi + 4 i p^2 \pi r \alpha t) e^{p^2(-t^2 + 2i r \alpha t + r^2 \alpha^2)}}{\pi} + \\
 & \left. + 1/8 \frac{(\pi - 2 p^2 \pi t^2 + 2 p^2 \pi r^2 \alpha^2 - 4 i p^2 \pi r \alpha t) e^{p^2(-t^2 - 2i r \alpha t + r^2 \alpha^2)}}{\pi} - 1/2 \frac{p r \alpha}{\sqrt{\pi}} \right], \quad (4)
 \end{aligned}$$

где $\operatorname{erf}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp(-z^2) dz$ – комплексный интеграл вероятности.

Будем полагать, что функция $\vec{w}(t)$ в (1) имеет следующий вид:

$$\vec{w}(t) = \vec{f}_u \cdot F(r,t), \quad (5)$$

где $F(r,t)$ определена в (3); векторы \vec{f}_u и \vec{v} взаимно ортогональны.

2. Модель шума и результаты численных расчетов

Пусть все микросейсмические события приурочены к продуктивному пласту мощностью 20 м, имеющему блочное строение и расположенному горизонтально в однородной среде со следующими значениями сейсмических волн: $V_p = 2400$ м/с, $V_s = 2400 / \sqrt{3}$ м/с.



Будем полагать, что объемы дислокаций разного масштаба равны между собой [3], их толщины пропорциональны линейному размеру [7]. Считаем скорость подвода энергии к дислокациям разного масштаба одинаковой и постоянной во времени.

Тогда энергия и период следования сигналов отдельного микросейсмического источника будут пропорциональны площади дислокации, а пространственная плотность событий — обратно пропорциональна линейному размеру блоков в третьей степени, что схоже с известным сейсмологическим законом повторяемости землетрясений [8].

В соответствии с экспериментальными данными [5] зададим доминантные частоты блоков в виде дискретного набора:

$$\omega_{0_k} = 2\pi D \times V_p / Kl_0; K = 1, 2, \dots, 12,$$

где $D = 0,022$ [7], l_0 — минимальный размер блока (дислокации), отвечающего за верхнюю частоту генерируемых колебаний. В численных экспериментах был задан диапазон сейсморазведочных частот от 10 Гц ($K = 12$) до 120 Гц ($K = 1$), представляющий практический интерес.

Будем полагать, что источники шума равномерно распределены в объеме продуктивного пласта. Для каждой группы источников с одинаковым значением доминантной частоты зададим свою пространственно-временную плотность событий $1/60 \times (\omega_{0_k} / \omega_{0_1})^3, (\text{м}^3 \times \text{с})^{-1}$, учитывая указанный выше зависимость от линейного размера блоков. Энергию и время следования событий, генерируемых дислокациями различного размера, устанавливаем пропорционально значению параметра $(\omega_{0_1} / \omega_{0_k})^2$, отражающего отношение их площадей.

Направление пары ортогональных векторов \vec{v} и \vec{f}_u , фигурирующих в (1), (5), выбираем случайным образом. Временные последовательности микросейсмических сигналов генерируем независимо для каждой группы источников с равномерным распределением по времени в период наблюдений длительностью 60 с.

Рассматривались два случая: 1) приемники расположены внутри продуктивного пласта блочного строения, 2) регистрирующая система находится в однородной среде, вмещающей пласт (рис. 2).

Ориентация трех компонентных приемников согласована с системой координат.

В первом эксперименте приемники расположены внутри продуктивного пласта на расстоянии в один метр между собой.

Микросейсмические шумы, регистрируемые приемниками, рассчитывались по формуле (1) по каждой группе источников отдельно. Дискретизация по времени составляла 5×10^{-4} с. Полученные по группам результаты были просуммированы. Пример итоговой синтетической сейсмограммы X-компоненты микросейсмического шума с разной степенью детализации временной шкалы показан на рисунке 3.

Отметим, что пики большой амплитуды на сейсмограмме (рис. 3) связаны с сигналами от близлежащих источников.

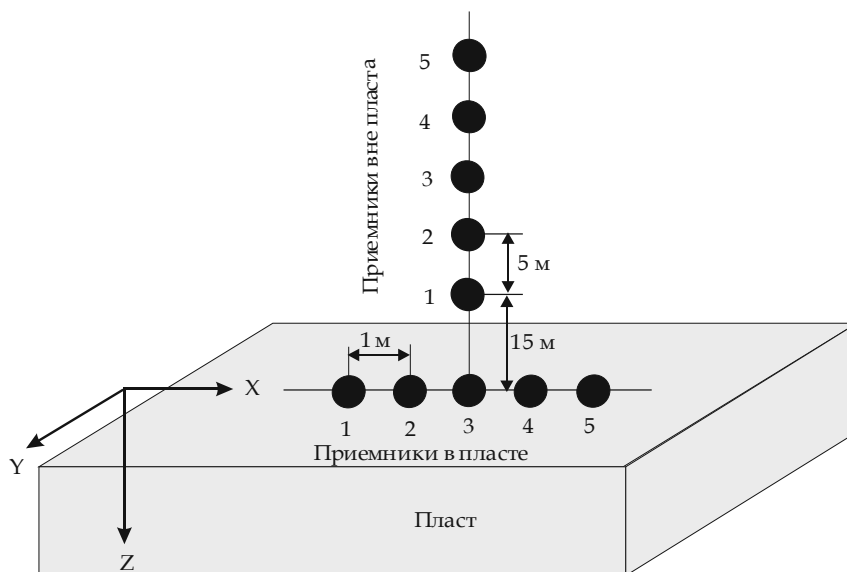


Рис. 2. Схема размещения приемников в продуктивном пласте

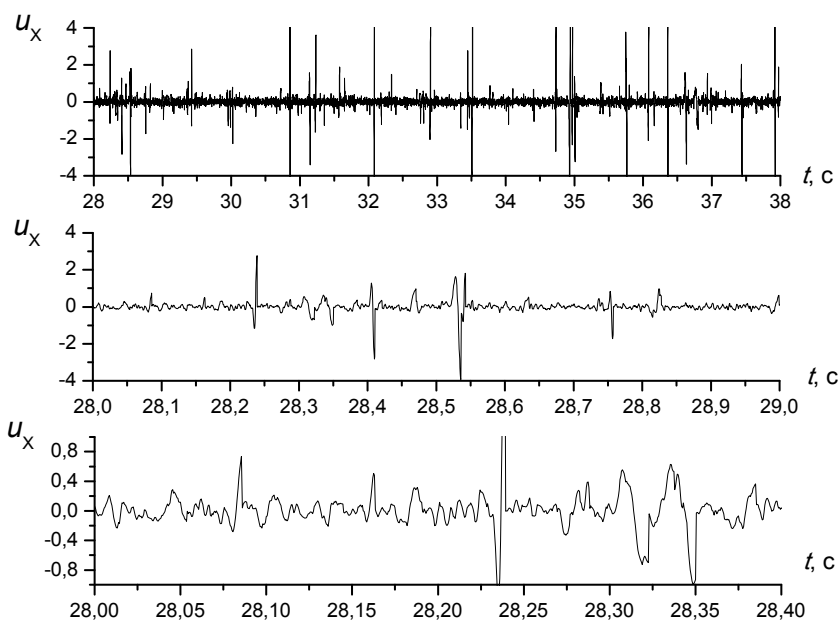


Рис. 3. Синтетическая сейсмограмма X-компоненты микросейсмического шума внутри продуктивного пласта (эксперимент 1)

Для определения взаимосвязи сигналов, принятых разными приемниками, были вычислены коэффициенты корреляции между соответствующими компонентами сигналов в разных точках приема. Полученные значения представлены в таблице 1.



Таблица 1

Корреляция микросейсмов в продуктивном пласте*X-компонента*

№ приемника	1	2	3	4	5
1	1	0,5025281	0,3302378	0,2320549	0,1723080
2	0,5025281	1	0,6789085	0,4667565	0,3342566
3	0,3302378	0,6789085	1	0,7373485	0,5239655
4	0,2320549	0,4667565	0,7373485	1	0,7986688
5	0,1723080	0,3342566	0,5239655	0,7986688	1

136

Y-компонента

№ приемника	1	2	3	4	5
1	1	0,4243855	0,2492039	0,1677603	0,1041544
2	0,4243855	1	0,4993286	0,3127862	0,1848669
3	0,2492039	0,4993286	1	0,6221576	0,3526777
4	0,1677603	0,3127862	0,6221576	1	0,6698635
5	0,1041544	0,1848669	0,3526777	0,6698635	1

Z-компонента

№ приемника	1	2	3	4	5
1	1	0,4953246	0,2873339	0,1910331	0,1251473
2	0,4953246	1	0,5179037	0,3260742	0,2162353
3	0,2873339	0,5179037	1	0,5996217	0,3523680
4	0,1910331	0,3260742	0,5996217	1	0,6488788
5	0,1251473	0,2162353	0,3523680	0,6488788	1

Видно, что радиус корреляции микросейсмов в продуктивном пласте меньше 1 м.

Во втором эксперименте профиль наблюдений расположен перпендикулярно пласту (рис. 2). Расстояние между приемниками составляет 5 м, минимальное расстояние от приемников до кровли пласта – 15 м. Из-за большего расстояния между приемниками и источниками микросейсмических событий время наблюдения увеличено до 600 с.

Пример синтетической сейсмограммы X-компоненты микросейсмического шума, зарегистрированного приемником № 2, показан на рисунке 4 с разной степенью детализации временной шкалы.

Полученные графики имеют более сглаженный характер по сравнению с сейсмограммой на рисунке 3, не содержат выраженных пиков сигнала, что особенно заметно на коротких временных интервалах.

На рисунке 5 представлены графики спектральной плотности микросейсмического шума в продуктивном пласте и вне его пределов. Внутри пласта спектр обогащен высокочастотными составляющими, менее сглажен за счет большего влияния близкорасположенных источников.

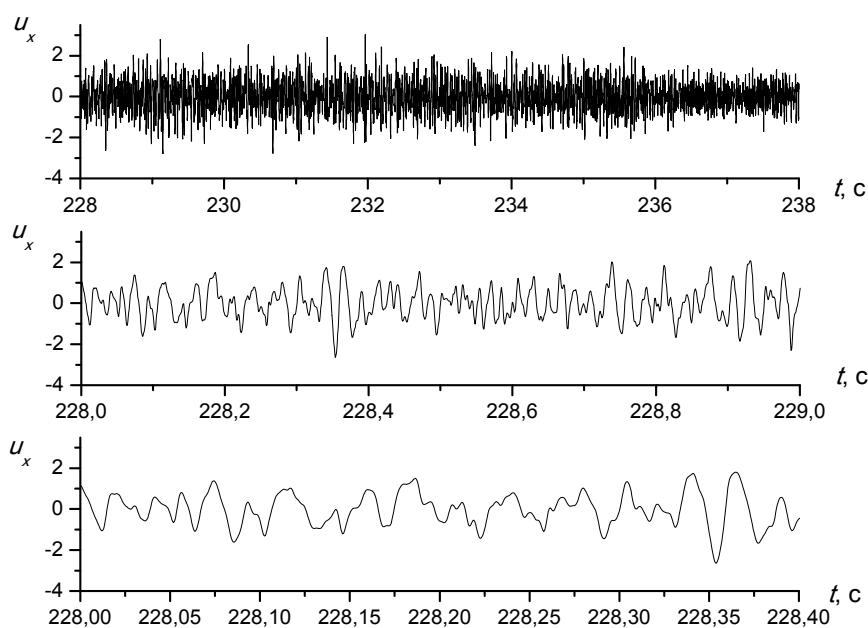


Рис. 4. Синтетическая сейсмограмма X-компоненты микросейсмического шума вне продуктивного пласта (эксперимент 2, приемник № 2)

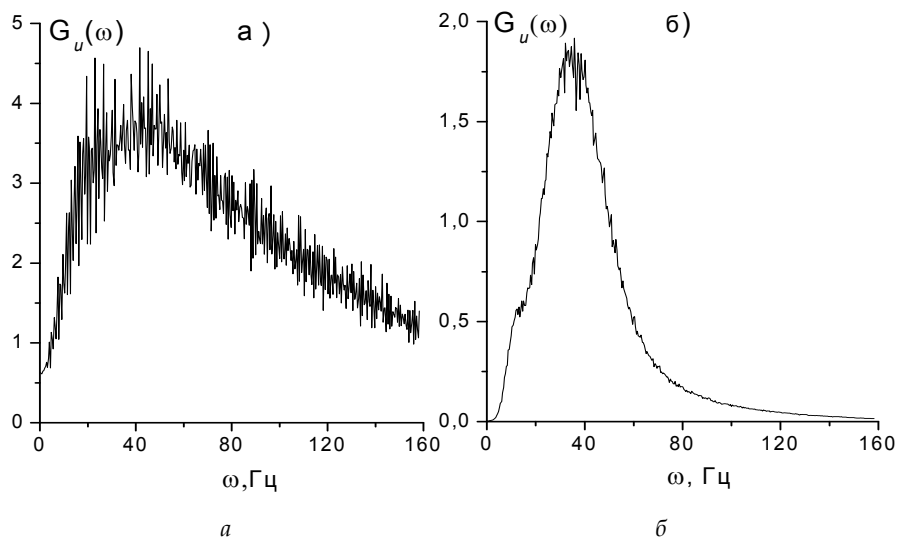


Рис. 5. Спектральная плотность X-компоненты микросейсмического шума в продуктивном пласте (а) и вне продуктивного пласта (б) (приемник № 2)

Значения коэффициентов корреляции между соответствующими компонентами сигналов в разных точках приема регистрирующей системы вне пласта (рис. 2) приведены в таблице 2.



Отметим высокие значения коэффициентов корреляции Z-компоненты микросейсмического сигнала между соседними приемниками при выносе сейсмоприемников вне зоны генерации шумов, что может быть использовано для локации таких зон в геологической среде.

Предложенная модель микросейсмического шума хорошо описывает форму сигналов и спектральный состав микросейсмического шума продуктивных пластов блочного строения, зависимость радиуса корреляции среднечастотных микросейсмиков от положения приемников по отношению к пласту, генерирующему шум.

Корреляция микросейсмиков вне продуктивного пласта*X-компонента*

№ приемника	1	2	3	4	5
1	1	0,6443400	0,1476195	-0,1706539	-0,2785052
2	0,6443400	1	0,6494048	0,1440907	-0,1885829
3	0,1476195	0,6494048	1	0,6543913	0,1423415
4	-0,1706539	0,1440907	0,6543913	1	0,6586707
5	-0,2785052	-0,1885829	0,1423415	0,6586707	1

Y-компонента

№ приемника	1	2	3	4	5
1	1	0,6477117	0,1534663	-0,1678226	-0,2803487
2	0,6477117	1	0,6518418	0,1475161	-0,1875984
3	0,1534663	0,6518418	1	0,6556661	0,1433333
4	-0,1678226	0,1475161	0,6556661	1	0,6587450
5	-0,2803487	-0,1875984	0,1433333	0,6587450	1

Z-компонента

№ приемника	1	2	3	4	5
1	1	0,8524379	0,5550823	0,2615874	0,0366206
2	0,8524379	1	0,8476838	0,5426787	0,2464935
3	0,5550823	0,8476838	1	0,8424351	0,5288800
4	0,1910331	0,5426787	0,8424351	1	0,8366847
5	0,0366206	0,2464935	0,5288800	0,8366847	1

При размещении приемников в продуктивном пласте для выделения полезного сигнала следует применять алгоритмы подавления слабо коррелируемого шума.

Для задач локации эндогенных сейсмических событий на основе решения обратных кинематических задач предпочтительно устанавливать сейсмические приемники вне продуктивного пласта.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-05-31493).



Список литературы

1. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т. 247, № 4. С. 829–831.
2. Курленя М. В., Миренков В. Е., Сердюков С. В. Взгляд на природу напряженно-деформированного состояния недр Земли и техногенные динамические явления // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 8. С. 5–19.
3. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. М., 1986.
4. Сердюков С. В., Курленя М. В. Механизм стимуляции добычи нефти сейсмическими полями малой интенсивности // Акустический журнал. 2007. Т. 53, № 5. С. 703–714.
5. Курленя М. В., Сердюков С. В. Низкочастотные резонансы сейсмической люминесценции горных пород в вибросейсмическом поле малой энергии // ФТПРПИ. 1999. № 1. С. 3–7.
6. Аки К., Ричардсон П. Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1. М., 1983.
7. Николаевский В. Н. Механизм вибровоздействия на нефтеотдачу месторождений и доминантные частоты // ДАН СССР. 1989. Т. 307, № 3. С. 570–575.
8. Ризниченко Ю. В. Проблемы сейсмологии. М., 1985.

Об авторах

Валерий Всеволодович Сказка — д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН, Новосибирск.
E-mail: vskazka@ngs.ru

Сергей Владимирович Сердюков — д-р техн. наук, гл. науч. сотр., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: ss3032@yandex.ru

Александр Сергеевич Сердюков — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., Институт горного дела СО РАН, Новосибирск.
E-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru

About authors

Dr Valeriy Skazka — prof., senior research fellow, Sobolev Institute of Mathematics (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), Novosibirsk.
E-mail: vskazka@ngs.ru

Dr Sergey Serdyukov — prof., principal research fellow, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: ss3032@yandex.ru

Alexandr Serdyukov — PhD, junior research fellow, Institute of Mining (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences), Novosibirsk.
E-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru