



ПЕРСПЕКТИВЫ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ОСНОВЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Александр Сергеевич Сердюков^{1,✉}, Антон Альбертович Дучков²

^{1,2}Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

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

¹SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2726-6904>

²DuchkovAA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7876-6685>

Аннотация. В статье исследуется возможность расширения частотного диапазона наземной сейсморазведки в область низких частот за счет использования монохроматических источников сейсмических колебаний. Наличие низких частот особенно важно для применения полноволнового обращения (FWI) сейсмических данных. Генерация частот ниже 5 Гц представляет техническую сложность для современных гидравлических вибраторов. Авторы исследуют возможность использования для более низких частот дебалансных вибраторов в режиме монохромных сигналов. Реализован метод полноволнового обращения в частотной области. На численных экспериментах показана принципиальная возможность постепенного построения скоростной модели по монохромным сигналам с дискретным шагом по частоте с 2 Гц. Полученная скоростная модель оказывается лучше, чем стандартное обращение для данных от непрерывного свип-сигнала с 5 Гц. Показана перспективность использования монохроматических источников для расширения нижнего частотного диапазона сейсморазведки.

Ключевые слова: наземная сейсморазведка, дебалансные вибрационные источники, монохроматические сейсмические волновые поля, метод полноволнового обращения FWI, уравнение Гельмгольца, численные методы и эксперименты

Финансирование: исследование выполнено по плану базовых научно-исследовательских работ ИНГГ СО РАН (проект Минобрнауки РФ FWZZ-2022-0017).

Для цитирования: Сердюков А.С., Дучков А.А. Перспективы сейсморазведки на основе монохроматических сейсмических источников // Геофизические технологии. 2025. № 3. С. 12–26. doi:10.18303/2619-1563-2025-3-12.

PROSPECTS OF SEISMIC EXPLORATION BASED ON MONOCHROMATIC SEISMIC SOURCES

Alexandr S. Serdyukov^{1,✉}, Anton A. Duchkov²

^{1,2}Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

¹N.A. Chinakal Institute of Mining, SB RAS, Krasny Ave., 54, Novosibirsk, 630091, Russia,

¹SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2726-6904>

²DuchkovAA@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7876-6685>

Abstract. We study the possibility of expanding the low-frequency range of land seismic exploration using monochromatic seismic sources. Low frequencies are particularly important for the application of seismic full-wave inversion (FWI). Generating frequencies below 5 Hz presents a significant challenge for modern hydraulic vibrators. The authors investigate the possibility of using lower-frequency unbalanced vibrators in monochromatic signal mode. We implemented a

frequency-domain full-wave inversion for testing the fundamental possibility of gradually constructing a velocity model from monochromatic signals with an incremental frequency step of 2 Hz. The resulting velocity model is better than the standard FWI of data from a continuous sweep signal starting from 5 Hz. This study demonstrates the potential of using monochromatic sources to expand the lower frequency range of seismic exploration.

Keywords: seismic exploration, eccentric vibroseis sources, monochromatic seismic sources, full wave inversion (FWI) method, Helmholtz equation, numerical methods and experiments

Funding: the study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0017.

For citation: Serdyukov A.S., Duchkov A.A. Prospects of seismic exploration based on monochromatic seismic sources // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2025. No. 3. P. 12–26. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2025-3-12.

ВВЕДЕНИЕ

Получение сейсмических данных на основе генерации свип-сигналов при помощи мощных виброисточников является стандартной практикой [Селезнев и др., 2013; Жуков и др., 2022]. В настоящее время эта методика по объему использования превышает применение взрывных источников. Кроме разведочных работ малогабаритные виброисточники набирают популярность в малоглубинной сейсморазведке [Яблоков и др., 2022]. Преимуществами использования вибрационных источников являются большая безопасность, меньший вред экологии, возможность контроля параметров зондирующего сигнала, ускорение проведения полевых работ. Качество получаемых данных, тем не менее, все еще уступает использованию взрывных источников [Фиников, Шалашников, 2021].

Одной из проблем является сложность генерации низких частот современными виброисточниками, что необходимо для повышения глубинности и разрешающей способности сейсморазведочных исследований. Современная вибросейсмика стремится к созданию «идеального» свип-сигнала линейной разверткой частоты в широком диапазоне частот с сохранением одинакового по силе воздействия на грунт на различных частотах. Это позволяет после корреляции виброграмм получать широкополосный импульс по аналогии со взрывной сейсморазведкой. Для современных гидравлических вибраторов возможность работать на полном приводе доступна с 5.4 Гц [Li et al., 2019]. Заметим, что дальнейшее расширение в область низких частот затруднено для гидравлических вибраторов по техническим причинам [Шнеерсон, Жуков, 2010].

В современной сейсморазведке углеводородов применяются исключительно гидравлические виброисточники, которые развиваются с 70-х годов прошлого века [Alekseev et al., 2005]. Как было сказано выше, современные тяжелые источники (20–30 тонн) позволяют довести нижнюю рабочую частоту до 5 Гц. В СССР также начиная с 70-х годов прошлого столетия развивался альтернативный подход механических (дебалансных) виброисточников [Alekseev et al., 2005; Чичинин, Сагайдачная, 2013]. Этот тип возбуждения позволил создавать рекордные по мощности источники (до 100 тонн) для региональных сейсмических исследований с регистрацией сигналов на выносах до 300 км [Alekseev et al., 2005]. Проводились также исследования¹ по возможности применения мощных виброисточников для интенсификации добычи нефти [Сердюков и др., 1991]. Эксперименты по использованию дебалансных источников для сейсмических исследований проводились и в других странах (США, Япония) [Ikuta et al., 2002; Saiga et al., 2006].

¹ Сердюков С.В. Результаты опытно-промысловых работ по вибросейсмическому воздействию с дневной поверхности на продуктивные пласты Северо-Салымского нефтяного месторождения. Отчет СКТБ ИГД СО РАН. Новосибирск, 1996. 281 с.

В целом дебалансные источники с точки зрения механики являются более дешевыми и простыми устройствами по сравнению с гидравлическими. Они идеально подходят для генерации монохроматических сигналов. Недостатком дебалансных источников является сложность обеспечения непрерывного изменения частоты с сохранением равномерного усилия на грунт в широком диапазоне частот, т. е. для генерации популярных в настоящее время широкополосных свип-сигналов. Видимо, по этой причине в настоящее время рынок полностью занят гидравлическими виброисточниками.

Следует отметить, что важный запрос на генерацию низких частот зондирующего сейсмического сигнала исходит от метода полноволнового обращения сейсмических данных (Full Waveform Inversion, FWI) [Virieux, Operto, 2009]. Этот метод позволяет использовать сейсмические трассы для прямого построения скоростной модели исследуемой среды. Интересно, что популярным подходом к реализации FWI является поэтапная инверсия частотных компонент данных от низких к высоким частотам; в англоязычной литературе этот подход иногда называют multiscale FWI [Bunks et al., 1995]. Он позволяет избегать попадания в локальные минимумы при оптимизации функционала невязки из-за так называемого эффекта «пропуска фазы» (cycle-skipping). В большинстве работ [Pratt et al., 1998; Virieux, Operto, 2009] multiscale FWI осуществляется путем применения к данным узкополосных фильтров, т. е. инверсия производится не для данных на одной выбранной частоте, а для узкополосного сигнала вокруг этой частоты, что все еще требует на входе данных с широким непрерывным спектром.

В настоящей статье мы исследуем возможность получения достоверного восстановления разрезов сейсмических скоростей при помощи обработки записей «чисто» монохроматических волновых полей методом FWI. Это позволит отказаться от генерации широкополосных свип-сигналов, используя вместо этого монохроматические волновые поля, генерируемые для небольшого набора частот (8–15 Гц), что позволит использовать дебалансные источники, характеристики которых оптимальным образом подбираются для генерации определенных частот. Наши численные эксперименты демонстрируют перспективность предлагаемой методики.

ДЕБАЛАНСНЫЕ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ

Рассмотрим принцип работы и технические особенности дебалансных вибрационных источников. Усилие, передаваемое на грунт, достигается за счет инерции массы m , вращающейся вокруг оси (рис. 1, а). Пусть расстояние от центра массы до оси вращения равно r . Амплитуда возмущаемой (вибротяговой) силы будет определяться выражением:

$$F = 4\pi^2 f^2 M_s, \quad (1)$$

где M_s – статический момент, а f – частота генерируемых колебаний. Таким образом возникают, в том числе, и колебания в горизонтальном направлении, которые значительно осложняют применение виброисточника на практике. Горизонтальные вибрации можно подавить, используя два одинаковых вала, вращающихся в противоположных направлениях. Как видно из формулы (1), вибротяговая сила пропорциональна квадрату частоты. Для того чтобы выровнять усилие на различных частотах, в ходе генерации свип-сигналов, можно добавить еще один нижний ряд валов (см. рис.1, б), вращающихся с задержкой фазы относительно верхнего ряда. Амплитуда вибротяговой силы в этом случае дается соотношением:

$$F = 4\pi^2 f^2 M_s \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right),$$

где M_s – максимальный статический момент генератора колебаний, α – угол разведения дебалансов верхнего и нижнего рядов валов генератора колебаний между собой.

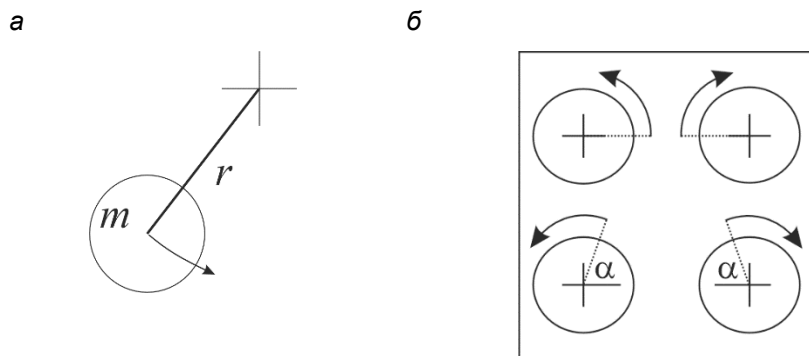


Рис. 1. Принципы работы вибрационного дебалансного источника: а – вращение массы вокруг оси (возникает инерционная сила), б – два ряда валов: компенсация горизонтальных колебаний и регулирование усилия за счет угла разведения верхних и нижних дебалансов.

Такая схема применяется в виброисточнике ВРП-30/120, широко использовавшегося в СССР в 80-х годах в качестве вибропогружателя для строительных работ. Приведем здесь некоторые характеристики ВРП-30/120. Система управления обеспечивает работу вибратора в гармоническом режиме и режиме линейной развертки частоты вибрации по времени. Генератор колебания весом 8 250 кг устанавливается на платформу весом 46 750 кг и площадью 20 м². Виброисточник ВРП-30/120 с такими параметрами позволяет развивать максимальное усилие, прилагаемое к грунту, порядка 45 т. Минимальная частота генерируемых колебаний составляет 4.0 Гц, а максимальная 8.7 Гц. Диапазон частот можно несколько расширить. Известно, что в ходе работ по изучению вибрационного воздействия на нефтяные месторождения [Сердюков и др., 1991] с использованием ВРП-30/120 максимальную частоту вибраций доводили до 16 Гц. В типичных данных сейсморазведки отраженных волн присутствуют и более высокочастотные компоненты. В то же время при увеличении частоты вращения валов вибрационных дебалансных источников повышается нагрузка на подшипники, что приводит к их быстрому износу. Этого можно избежать за счет уменьшения статического момента M_s , что, в свою очередь, приведет к избыточному уменьшению усилия на низких частотах. Менять M_s в ходе генерации свип-сигнала проблематично с технической точки зрения.

В то же время, если использовать виброисточник только в монохроматическом режиме, то положение центра масс маятника можно менять перед каждым запуском. Отметим, что даже при вращении валов с постоянной частотой, прилагаемое усилие на грунт, как функция от времени, не является косинусом и синусом в чистом виде. Дополнительные частоты в этом случае являются помехами и могут быть отфильтрованы применением простейшей цифровой фильтрации к записям.

Одной из задач при проведении сейсморазведки является снижение времени, затрачиваемого на проведение работ. Это позволяет увеличить плотность получаемых данных. Существуют методики

высокопроизводительных работ, заключающиеся в одновременном возбуждении свип-сигналов несколькими источниками, разделенными по времени (метод slip-sweep) [Rozamond, 1996] или расстоянию (метод DS3) [Bouska, 2010]. Применение таких методик негативно влияет на качество данных – необходимо применять дополнительные этапы обработки, направленные на разделение волновых полей разных возбуждений и подавление гармонических помех [Акуленко и др., 2023]. Если использовать несколько монохроматических дебалансных вибрационных источников, то можно их одновременно запускать на различных частотах – данные при этом разделяются без особых проблем простейшими методами цифровой фильтрации.

Таким образом, можно заключить, что дебалансные виброисточники с технической точки зрения являются перспективными для генерации сигналов на наборе отдельных частот. В этом случае значительно упрощается система их управления и минимизируется износ.

МЕТОД ПОЛНОВОЛНОВОГО ОБРАЩЕНИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Полноволновое обращение сейсмических данных требует многократного решения прямой задачи – численное моделирование распространения сейсмических волн в моделях среды с заданными свойствами. В настоящей статье моделирование распространения волновых полей осуществляется в акустической постановке путем решения уравнения Гельмгольца:

$$\Delta u + \frac{(2\pi f)^2}{v^2(\mathbf{x})} u = h(f) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s),$$

где $u(\mathbf{x})$ – давление (преобразование Фурье от давления как функции времени в точке \mathbf{x} на заданной частоте f), $v(\mathbf{x})$ – скорость распространения сейсмических волн, $h(f)$ – спектр инициализирующего импульса, δ – дельта-функция.

Для численного решения данного уравнения нами была реализована конечно-разностная схема, представленная в работе [Chen et al., 2013]. Для подавления отражений на границах расчетной области используются идеально согласованные поглощающие слои (PML).

Задача определения скоростной модели исследуемой геологической среды сводится к минимизации функционала невязки:

$$E[v(\mathbf{x})] = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{d}^\dagger \Delta \mathbf{d}, \quad \Delta \mathbf{d} = \mathbf{d}_{obs} - \mathbf{d}_{synth}, \quad (2)$$

где символ \dagger обозначает комплексное сопряжение и транспонирование, \mathbf{d}_{obs} – вектор-столбец наблюдаемых данных, \mathbf{d}_{synth} – вектор-столбец данных, численно рассчитанных с помощью метода конечных разностей для скоростной модели $v(\mathbf{x})$, $\Delta \mathbf{d}$ – компоненты вектора-столбца невязки между наблюдаемыми и модельными данными.

Минимизация функционала (2) производится итеративным методом отдельно для каждой частоты, начиная с самой низкой. Полученная в ходе оптимизации скоростная модель используется в качестве начального приближения при переходе к более высокой частоте.

Для поиска минимума функционала невязки (2) используется алгоритм Гаусса–Ньютона, который требует вычисления градиента и Гесссиана [Тao, Sen, 2013].

Градиент является вектором и находится по формуле:

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{v}} = g(\mathbf{x}) = \sum_f \sum_{\mathbf{x}_r} \sum_{\mathbf{x}_s} \operatorname{Re} \left[\frac{-2\omega^2 h(f)}{v^3(\mathbf{x})} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f) G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, f) \Delta d^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f) \right], \quad (3)$$

где \mathbf{x} – вектор-столбец координат точки исследуемой области, $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f)$ – функция Грина, т. е. решение уравнения Гельмгольца для источника в точке \mathbf{x}_s , символ $*$ обозначает комплексное сопряжение.

Гессиан представляет собой матрицу:

$$H(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_f \sum_{\mathbf{x}_r} \sum_{\mathbf{x}_s} \operatorname{Re} \left[\frac{4\omega^4 |h(f)|}{v^3(\mathbf{x}) v^3(\mathbf{y})} G^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f) G(\mathbf{y}, \mathbf{x}_s, f) G^*(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, f) G(\mathbf{y}, \mathbf{x}_r, f) \right], \quad (4)$$

где \mathbf{x} и \mathbf{y} независимо друг от друга «пробегают» всевозможные точки сетки исследуемой области.

На практике выражение для Гессиана (4), как правило, не используется из-за слишком большого объема вычислений и требуемой памяти (данная матрица уже не является разреженной). Вместо этого, во многих реализациях FWI используется только диагональная часть Гессиана [Tao, Sen, 2013]. Диагональные элементы матрицы определяются следующим образом:

$$H_0(\mathbf{x}) = \sum_f \sum_{\mathbf{x}_r} \sum_{\mathbf{x}_s} \operatorname{Re} \left[\frac{4\omega^4 |h(f)|^2}{v^6(\mathbf{x})} |G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_s, f)|^2 |G(\mathbf{x}, \mathbf{x}_r, f)|^2 \right]. \quad (5)$$

На каждом шаге алгоритма Гаусса–Ньютона получение нового приближения осуществляется, согласно формуле:

$$v_k(\mathbf{x}) = v_{k-1}(\mathbf{x}) + \mu (H_0 + \lambda I)^{-1} g(\mathbf{x}), \quad (6)$$

где добавка λI ограничивает возрастание компонент обратной матрицы, т. к. компоненты Гессиана могут быть близки к нулю. Скалярный множитель μ в (6) выбирается в ходе каждой k -той итерации, исходя из условия минимальности целевого функционала (1) [Köhn, 2011]:

$$\mu_{opt} = \arg \min_{\mu} (E[v_k(\mu)]). \quad (7)$$

Для поиска оптимального множителя, согласно (7), будем предполагать, что в окрестности минимума целевой функционал (2) является квадратичной функцией от параметра μ :

$$E(\mu) = a\mu^2 + b\mu + c. \quad (8)$$

Для определения коэффициентов a , b , c рассчитаем значение функционала для трех пробных значений. Эти значения будем искать по формуле:

$$\mu_i = p_i \frac{\max(v_k)}{\max(\delta v)}, \quad (9)$$

где $\delta v = (H_0 + \lambda I)^{-1} g(\mathbf{x})$ – множитель из правой части выражения (6) определяет направление поиска минимума целевого функционала в многомерном пространстве моделей на текущей итерации. Скалярные

коэффициенты p_i , $i = 1, 2, 3$, задающие максимальное приращение к скоростной модели, выбираются следующим образом: $p_1 = 0.0025$ $p_2 = 0.005$ $p_3 = 0.01$. После нахождения соответствующих значений функционала (E_1 , E_2 , E_3) для нахождения коэффициентов параболы (8) решаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{pmatrix} \mu_1^2 & \mu_1 & 1 \\ \mu_2^2 & \mu_2 & 1 \\ \mu_3^2 & \mu_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}.$$

После решения этой системы получим оптимальное значение множителя в формуле (6):

$$\mu = -\frac{b}{2a}.$$

Несмотря на то что в предлагаемом способе линейного поиска множителя μ значение функционала E находится всего три раза, это все равно занимает значительное время – требуется прямое моделирование, поэтому вычисления целесообразно проводить не для всех пар источник-приемник, а только для какой-то их малой части, что практически не сказывается на точности нахождения оптимального шага обновления скоростной модели.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследуем возможности метода полноволнового обращения применительно к монохроматическим данным, рассчитанным для синтетической скоростной модели “Marmousi” [Versteeg, 1994], показанной на рис. 2, а.

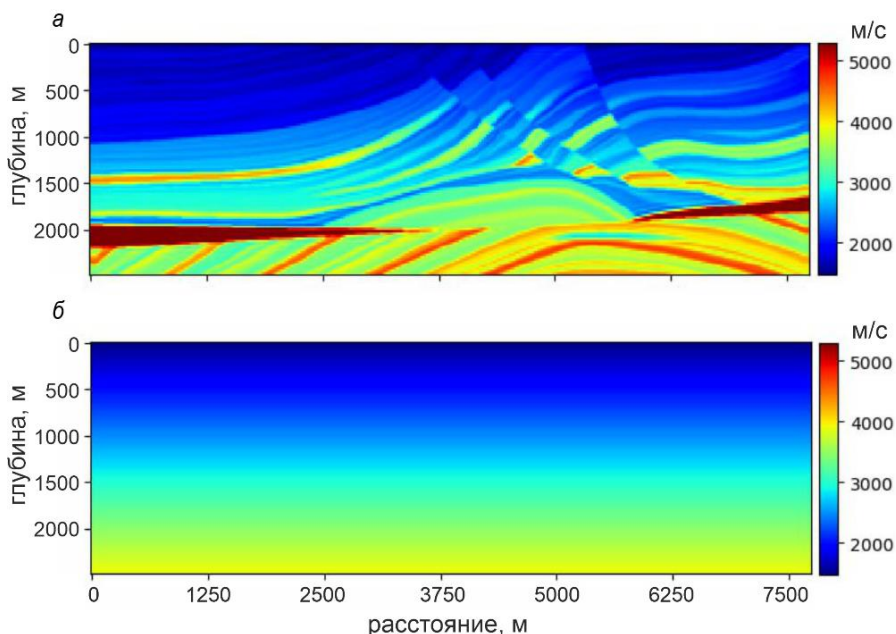


Рис. 2. Синтетическая скоростная модель «Marmousi» (а) и начальное приближение для FWI (б).

Эта геологическая модель представляет собой дельтовые отложения, залегающие на соленосной эвапоритовой толще. В восточной части разреза наблюдаются разломы, также присутствуют складчатые карбонатные отложения. Модель “Marmousi” традиционно применяется для тестирования алгоритмов

обработки сейсмических данных, в том числе и FWI. На рисунке 2, б представлена простая градиентная скоростная модель, использовавшаяся нами в качестве начального приближения.

Синтетические монохроматические данные рассчитывались при помощи конечно-разностной схемы [Chen et al., 2013]. В качестве примера на рис. 3, а приведена действительная часть решения уравнения Гельмгольца для частоты 8 Гц. Помимо применения FWI к монохроматическим полям нами для сравнения проводились эксперименты по FWI обращению волновых полей, генерируемых при помощи импульсных источников. Для этих экспериментов используем ту же самую программную реализацию FWI в частотной области. Расчеты проводятся для набора частот, а трассы во временной области получаются с помощью обратного преобразования Фурье. На рисунке 3, б приведена сейсмограмма для одного из пунктов возбуждения в случае использования импульса Рикера с центральной частотой 8 Гц. Форма этого зондирующего импульса и его спектр показаны на рис. 4, шаг по времени выбирался 1 мс, а длина сейсмической записи – 7 с. В соответствии с теоремой отчетов, моделирование сейсмограмм в данной ситуации требует решения уравнения Гельмгольца (1) на 160 отдельных частотах.

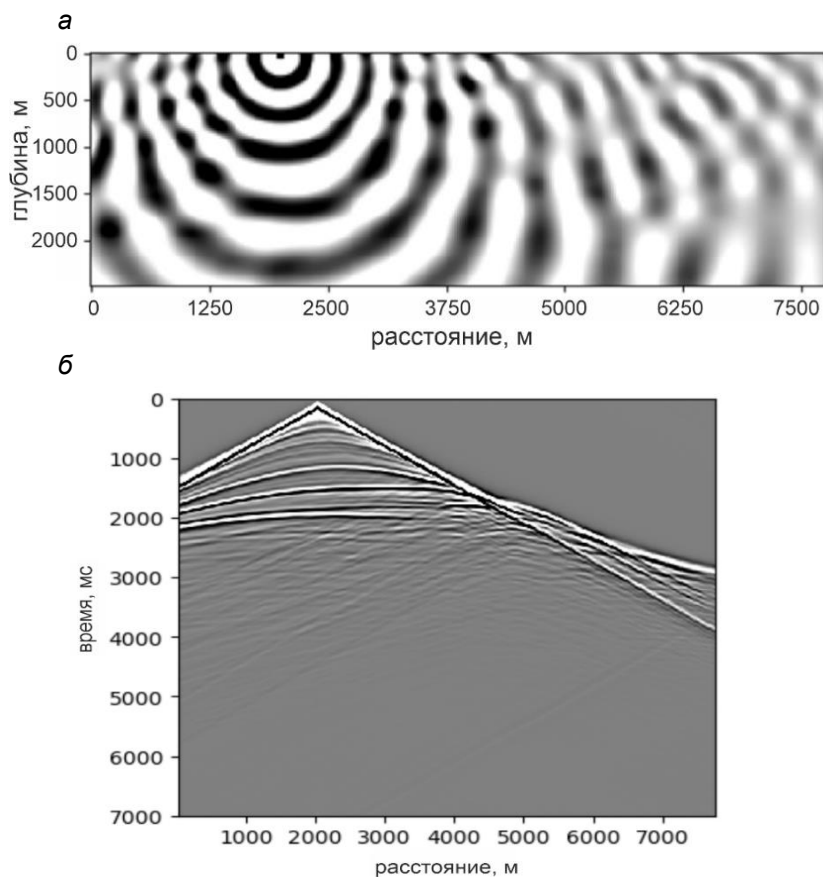


Рис. 3. Численное моделирование распространения сейсмических волн. Действительная часть решения уравнения Гельмгольца для частоты 8 Гц (а), одна из сейсмограмм общей точки возбуждения при использовании в источнике импульса Рикера с центральной частотой 8 Гц (б).

Заметим, что время подобного прямого моделирования в частотной области с применением последующего обратного преобразования Фурье соизмеримо с конечно-разностным решением соответствующей задачи для волнового уравнения во временной области (порядка 100 с для рассматриваемой модели с использованием Intel(R) Core(TM) i7-9700F CPU 3.00 GHz с оперативной памятью 32 Гб). В случае небольшого набора частот FWI монохроматических данных требует гораздо

меньшего машинного времени моделирования по сравнению с рассмотрением импульсных сейсмических источников. Решение уравнения Гельмгольца для рассматриваемой модели среды путем LU-разложения занимает 0.743 с (Intel(R) Core(TM) i7-9700F CPU 3.00 GHz, 32 Гб ОЗУ), а применение LU-разложения в ходе моделирования данных на одной частоте для многих положений источников – 0.0270 с (для одного источника с готовым LU).

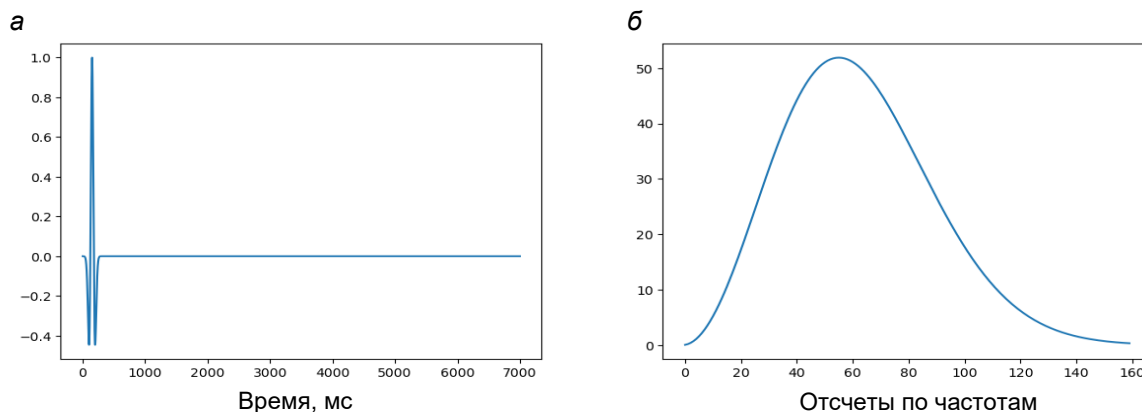


Рис. 4. Импульс Рикера с центральной частотой 8 Гц (а), частотный спектр импульса Рикера 8 Гц, снизу показано количество частотных отсчетов (б).

Численные эксперименты по обращению синтетических данных проводились по двум схемам, которые мы далее назовем «мономатическое FWI» и «FWI волновых полей импульсных источников»

Мономатическое FWI. В качестве начального приближения используется скоростная модель, приведенная на рис. 1, б. Далее последовательно совершаются итерации FWI для мономатических данных, переходя от одной частоты к следующей более высокой частоте. Итоговая скоростная модель, полученная на текущей частоте, используется далее в качестве начального приближения для итераций FWI на следующей частоте.

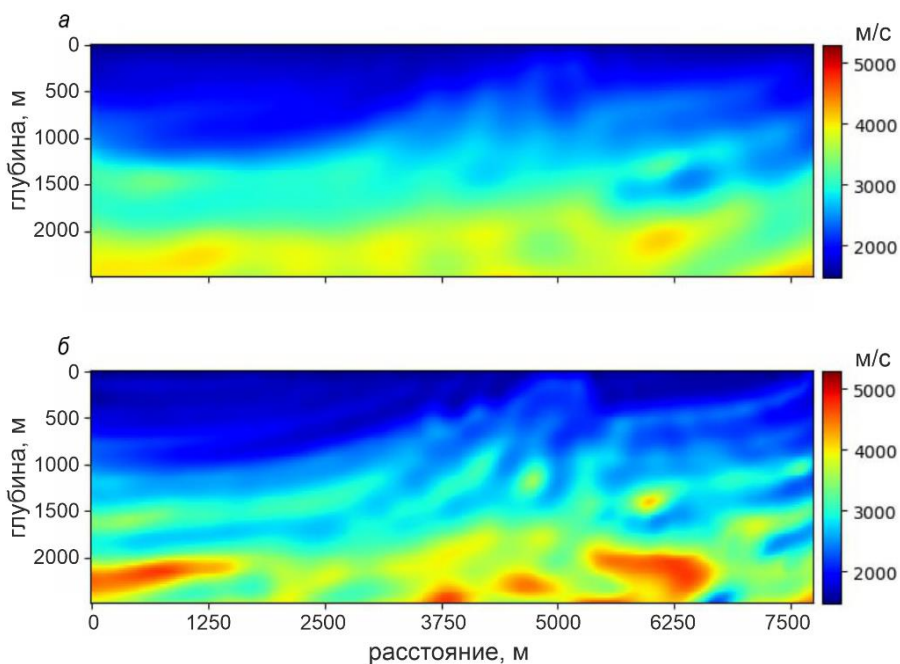


Рис. 5. Результаты FWI, полученные в низкочастотном диапазоне: а – результат восстановления после обращения мономатических сейсмических данных частоты 2 Гц; б – результат восстановления после обращения мономатических сейсмических данных частоты 4 Гц.

Были выбраны следующие частоты и количество итераций: 2 Гц – 8 итераций, 3 Гц – 10 итераций, 4 Гц – 10 итераций, 6 Гц – 14 итераций, 8 Гц – 15 итераций, 12 Гц – 20 итераций, 18 Гц – 20 итераций. Результаты инверсии показаны на рис. 5–7. Скоростная модель, полученная в качестве результата FWI на частоте 2 Гц, показана на рис. 5, а. Результат обращения после последовательных серий итераций на 2, 3 и 4 Гц приведен на рис. 5, б. Гладкую скоростную модель, полученную в этом низкочастотном диапазоне, можно уже использовать, например, при проведении процедуры миграции.

На рисунке 6 приведены результаты последующих итераций после обращения на частотах 6 и 8 Гц. Как видно из приведенных результатов, с каждым последующим этапом FWI получаемая скоростная модель становится более детальной – проявляются все более тонкие слои и структуры.

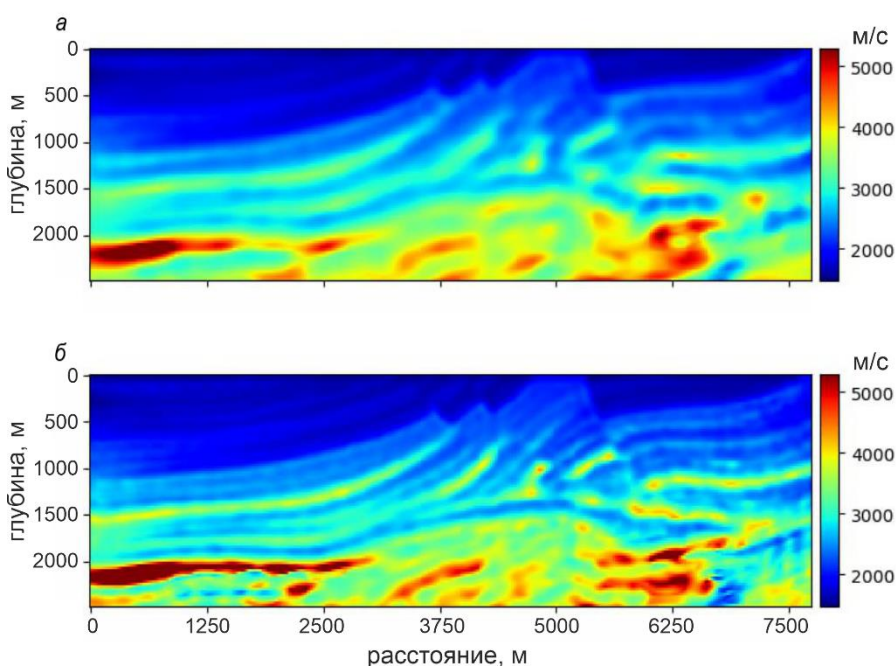


Рис. 6. Результаты FWI, полученные в диапазоне 6–8 Гц: а – результат восстановления после обращения монохроматических сейсмических данных частоты 6 Гц; б – результат восстановления после обращения монохроматических сейсмических данных 8 Гц.

Итоговый результат монохроматического FWI приведен на рис. 7, а. Для удобства сравнения на рис. 7, в мы еще раз приводим «истинную» скоростную модель. Результат монохроматического FWI получается достаточно достоверным, хотя и присутствуют заметные помехи. Нижняя часть скоростной модели, в особенности по краям, восстанавливается гораздо хуже по сравнению с верхней.

FWI волновых полей импульсных источников. Для сравнения рассмотрим стандартный подход к FWI, который требует данных отклика среды на свип-сигнал с линейной разверткой. На практике для выполнения последовательного по частотам FWI к данным следует применять полосовые фильтры с полосой пропускания вокруг выбранных центральных частот. Здесь мы вместо этого рассмотрим в источниках импульсы Рикера с различной центральной частотой. Как уже упоминалось, низкие частоты важны для успешного применения FWI. Использование гидравлических виброисточников ограничивает эти частоты. В численном эксперименте будем использовать на первом этапе FWI импульс Рикера с центральной частотой 5 Гц. Конечно, спектр данного сигнала содержит и более низкие частоты, но здесь будем условно считать, что такие данные получить возможно.

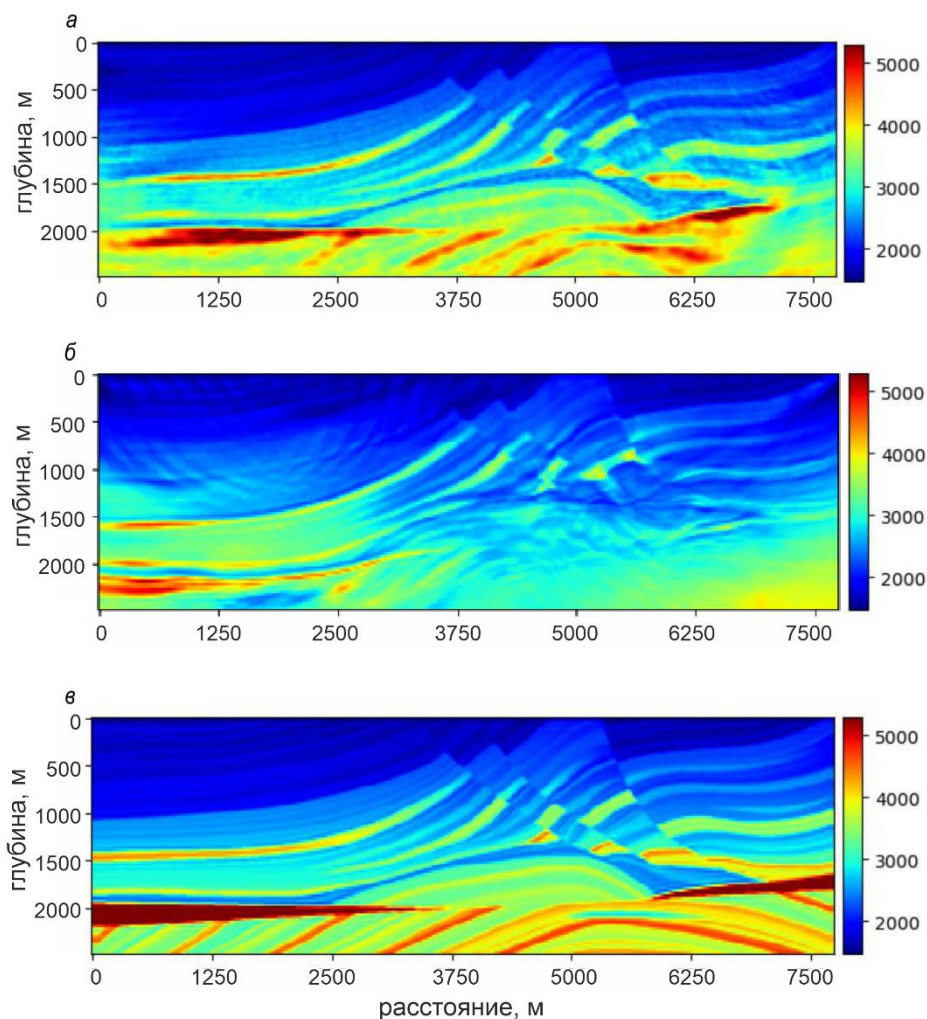


Рис. 7. Окончательные результаты FWI в сравнении с «истинной» скоростной моделью: *а* – результат восстановления после обращения монохроматических сейсмических данных частоты (вплоть до 18 Гц); *б* – итоговый результат FWI волновых полей импульсных источников начиная с 5 Гц; *в* – скоростная модель «Marmousi».

В качестве начального приближения, как и ранее, используется скоростная модель, приведенная на рис. 1, б. Далее последовательно совершаются итерации FWI для серии данных, полученных с использованием серии инициализирующих импульсов Рикера с повышающейся центральной частотой: 5 Гц – 10 итераций, 8 Гц – 10 итераций и 12 Гц – 10 итераций. Итоговый результат приведен на рис. 7, б. Видно, что результат получается значительно хуже по сравнению с FWI монохроматических данных, представленный на рис. 7, а. Это происходит из-за невозможности восстановления именно макроскоростной гладкой составляющей скоростной модели на первых итерациях с использованием импульса Рикера 5 Гц. Последующие итерации на более высоких частотах позволяют уточнять отдельные структуры верхней части исследуемого разреза. Заметим, что большее количество итераций не позволяет улучшить результат – метод просто перестает сходиться.

Отметим также, что рассмотренное обращение данных импульсных источников требует в разы больше вычислений по сравнению с монохроматическими данными. Например, как видно из рис. 4, б, для прямого моделирования поля, возбужденного импульсом Рикера с центральной частотой 8 Гц, требуется численно решать уравнение Гельмгольца для разных частот 160 раз (вместо того, чтобы один раз промоделировать монохроматические данные 8 Гц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование монохроматических сейсмических волновых полей является перспективным направлением развития методики наземной сейсморазведки из-за ряда причин. Для возбуждения таких волновых полей возможно использовать простые, с точки зрения технической реализации, дебалансные вибрационные источники, параметры которых будут подбираться оптимальным образом под каждый частотный диапазон. Для фильтрации полевых данных, в целях подавления нежелательных гармоник, возможно использовать простейшую цифровую фильтрацию. Благодаря простейшим приемам фильтрации возможно без потери качества разделять данные, генерируемые на различных частотах. Это позволяет ускорить проведение полевых работ за счет одновременной работы нескольких источников. Как показывают представленные численные эксперименты, для обработки серии монохроматических данных возможно использовать метод полевого обращения FWI в частотной области. Как показывают наши исследования, основной проблемой использования гидравлических приемников является отсутствие низких частот. В статье этот факт продемонстрирован путем применения FWI для серии синтетических данных, полученных с использованием импульсных источников Рикера, начиная с центральной частоты 5 Гц (что соответствует нижней границе получаемых с помощью современных гидравлических виброисточников данных). Результат обработки монохромных данных получается значительно более информативным, к тому же обработка монохроматических данных методом FWI требует гораздо меньшего времени вычислений. Заметим, что метод FWI был нами реализован с использованием простого алгоритма Гаусса–Ньютона. Использование более сложных схем минимизации и дополнительных методов регуляризации может, по-видимому, позволить получать более качественные результаты обращения монохроматических данных. В этом направлении, возможно, и стоит сосредоточить дальнейшие исследования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Акуленко А.С., Гафаров Р.М., Сираев И.А.** Анализ эффективности технологий подавления эффектов наложения гармонических искажений, возникающих при выполнении сейсморазведочных работ методом Slip-Sweep // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 1. С. 15–28. EDN:NEIYYU.
- Вибропогружатель** ВРП 30/120 с регулируемыми параметрами. Техническое описание. М.: В/О «Лицензиторг», 1983.
- Жуков А.П., Скирта Д.А., Шехтман Г.А.** Пути повышения производительности вибросейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2022. № 2. С. 57–70. EDN:DZPJKN.
- Селезнев В.С., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Ефимов А.С., Сальников А.С., Чичинин И.С., Кашун В.В., Романенко И.Е., Елагин С.А., Лисейкин А.В., Шенмайер А.Е., Сережников Н.А., Максимов М.А.** Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем Востоке России // Проблемы информатики. 2013. № 3 (20). С. 30–41. EDN:PNVTXJ.
- Сердюков С.В., Кривоуцкий В.С., Гамзатов С.М.** Исследования сейсмических и акустических полей при низкочастотном вибрационном воздействии на нефтяной пласт. Препр. ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1991. № 43.
- Фиников Д.Б., Шалашников А.В.** Способ сейсморазведки с вибрационными источниками // Геомодель 2021. Материалы 23-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и

газа, Геленджик, 06–10 сентября 2021 года. Москва: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2021. С. 18.
doi:10.3997/2214-4609.202157025. EDN:GPIPQP.

Чичинин И.С., Сагайдачная О.М. Невзрывные сейсмические источники с широким частотным спектром. Часть 2. Дебалансные вибраторы или что надо сделать, чтобы невзрывные сейсморазведочные источники имели широкий частотный спектр // Приборы и системы разведочной геофизики. 2013. Т. 45, № 3. С. 23–32. EDN:RPDKDV.

Шнеерсон М.Б., Жуков А.П. Современные тенденции вибрационной сейсморазведки // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. Т. 33, № 3. С. 19–25. EDN:OKVPYP.

Яблоков А.В., Дергач П.А., Сердюков А.С., Полозов С.С. Разработка и применение портативной вибрационной установки для сбора и анализа данных сейсмических поверхностных волн // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58, № 4. С. 5–18. doi:10.21455/si2022.4-1. EDN:DQUOGA.

Alekseev A.S., Chichinin I.S., Korneev V.A. Powerful low-frequency vibrators for active seismology // Bulletin of the Seismological Society of America. 2005. Vol. 95 (1). P. 1–17. doi:10.1785/0120030261.

Bouska J. Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition // Geophysical Prospecting. 2010. Vol. 58 (1). P. 123–153. doi:10.1111/j.1365-2478.2009.00843.x.

Bunks C., Saleck F.M., Zaleski S., Chavent G. Multiscale seismic waveform inversion // Geophysics. 1995. Vol. 60 (5). P. 1457–1473. doi:10.1190/1.1443880.

Chen Z., Cheng D., Feng W., Wu T. An optimal 9-point finite difference scheme for the Helmholtz equation with PML // International Journal of Numerical Analysis and Modeling. 2013. Vol. 10 (2). P. 389–410.

Ikuta R., Yamaoka K., Miyakawa K., Kunitomo T., Kumazawa M. Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29 (13). P. 5-1–5-5. doi:10.1029/2001GL013974.

Köhn D. Time domain 2D elastic full waveform tomography: PhD Thesis. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2011. 177 p.

Li G., Qi W., Ding Y.-P., Huang Z.-Q., Lian Z.-H., Tao Z.-F., Yang X.-Y. Method and application of extending seismic vibrator bandwidth toward low frequency // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 11 (10). doi:10.1177/1687814019884772.

Pratt R.G., Shin C., Hick G.J. Gauss–Newton and full Newton methods in frequency–space seismic waveform inversion // Geophysical Journal International. 1998. Vol. 133 (2). P. 341–362. doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00498.x.

Rozemond H.J. Slip-sweep acquisition // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996. SEG, 1996. P. 64–67. doi:10.1190/1.1826730.

Saiga A., Yamaoka K., Kunitomo T., Watanabe T. Continuous observation of seismic wave velocity and apparent velocity using a precise seismic array and ACROSS seismic source // Earth, Planets and Space. 2006. Vol. 58 (8). P. 993–1005. doi:10.1186/BF03352604.

Tao Y., Sen M.K. Frequency-domain full waveform inversion with plane-wave data // Geophysics. 2013. Vol. 78 (1). P. R13–R23. doi:10.1190/geo2012-0267.1.

Versteeg R. The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set // The Leading Edge. 1994. Vol. 13. P. 927–936. doi:10.1190/1.1437051.

Virieux J., Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Geophysics. 2009. Vol. 74 (6). P. WCC1–WCC26. doi:10.1190/1.3238367.

REFERENCES

- Akulenko A.S., Gafarov R.M., Siraev I.A.** Analysis of the efficiency of suppressing the harmonic distortion overlap during seismic exploration using the slip-sweep method // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2023. No. 1. P. 15–28 (In Russ.).
- Alekseev A.S., Chichinin I.S., Korneev V.A.** Powerful low-frequency vibrators for active seismology // Bulletin of the Seismological Society of America. 2005. Vol. 95 (1). P. 1–17. doi:10.1785/0120030261.
- Bouska J.** Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition // Geophysical Prospecting. 2010. Vol. 58 (1). P. 123–153. doi:10.1111/j.1365-2478.2009.00843.x.
- Bunks C., Saleck F.M., Zaleski S., Chavent G.** Multiscale seismic waveform inversion // Geophysics. 1995. Vol. 60 (5). P. 1457–1473. doi:10.1190/1.1443880.
- Chen Z., Cheng D., Feng W., Wu T.** An optimal 9-point finite difference scheme for the Helmholtz equation with PML // International Journal of Numerical Analysis and Modeling. 2013. Vol. 10 (2). P. 389–410.
- Chichinin I.S., Sagaydachnaya O.M.** Non-explosive seismic sources with a wide frequency spectrum. Part 2. Eccentric vibrators: what needs to be done for non-explosive seismic exploration sources to achieve a wide frequency spectrum // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2013. Vol. 45 (3). P. 23–32 (In Russ.).
- Finikov D.B., Shalashnikov A.V.** Seismic survey method with vibroseis sources // Geomodel 2021. Proceedings of the 23rd conference on geological exploration and development of oil and gas fields, Gelendzhik, September 06–10, 2021. Moscow: OOO «EAGE Geomodel», 2021. P. 18. (In Russ.). doi:10.3997/2214-4609.202157025.
- Ikuta R., Yamaoka K., Miyakawa K., Kunitomo T., Kumazawa M.** Continuous monitoring of propagation velocity of seismic wave using ACROSS // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29 (13). P. 5-1–5-5. doi: 10.1029/2001GL013974.
- Köhn D.** Time domain 2D elastic full waveform tomography: PhD Thesis. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 2011. 177 p.
- Li G., Qi W., Ding Y.-P., Huang Z.-Q., Lian Z.-H., Tao Z.-F., Yang X.-Y.** Method and application of extending seismic vibrator bandwidth toward low frequency // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 11 (10). doi:10.1177/1687814019884772.
- Pratt R.G., Shin C., Hick G.J.** Gauss–Newton and full Newton methods in frequency–space seismic waveform inversion // Geophysical Journal International. 1998. Vol. 133 (2). P. 341–362. doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00498.x.
- Rozemond H.J.** Slip-sweep acquisition // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1996. SEG, 1996. P. 64–67. doi:10.1190/1.1826730.
- Saiga A., Yamaoka K., Kunitomo T., Watanabe T.** Continuous observation of seismic wave velocity and apparent velocity using a precise seismic array and ACROSS seismic source // Earth, Planets and Space. 2006. Vol. 58 (8). P. 993–1005. doi:10.1186/BF03352604.
- Seleznev V.S., Solovyev V.M., Emanov A.F., Efimov A.S., Salnikov A.S., Chichinin I.S., Kashun V.V., Romanenko I.E., Elagin S.A., Liseikin A.V., Shenmaier A.E., Serezhnikov N.A., Maksimov M.A.** Deep vibroseismic studies in the Russian Far East // Problems of Informatics. 2013. No. 3 (20). P. 30–41 (In Russ.).
- Serdyukov S.V., Krivoputskiy V.S., Gamzatov S.M.** Research on seismic and acoustic fields during low-frequency vibroseismic impact on oil reservoirs. Novosibirsk, 1991. Preprint IGB SO USSR Academy of Sciences, No. 43 (In Russ.).

- Shneerson M.B., Zhukov A.P.** Modern trends in vibroseismic exploration // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2010. Vol. 33 (3). P. 19–25 (In Russ.).
- Tao Y., Sen M.K.** Frequency-domain full waveform inversion with plane-wave data // Geophysics. 2013. Vol. 78 (1). P. R13–R23. doi:10.1190/geo2012-0267.1.
- Versteeg R.** The Marmousi experience: Velocity model determination on a synthetic complex data set // The Leading Edge. 1994. Vol. 13. P. 927–936. doi:10.1190/1.1437051.
- Vibratory** Pile Driver VRP 30/120 with adjustable parameters. Technical description (In Russ.). VO Litsenzitorg, Moscow, 1983.
- Virieux J., Operto S.** An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics // Geophysics. 2009. Vol. 74 (6). P. WCC1–WCC26. doi:10.1190/1.3238367.
- Yablokov A.V., Dergach P.A., Serdyukov A.S., Polozov S.S.** Development and application of a portable vibration source for acquisition and analysis of seismic surface wave data // Seismic Instruments. 2022. Vol. 58 (Suppl. 2). P. S195–S203. doi:10.3103/S074792392208014X.
- Zhukov A.P., Skirta D.A., Shekhtman G.A.** The enhance of vibroseismic seismological surveys efficiency // Instruments and Systems of Exploration Geophysics. 2022. No. 2. P. 57–70 (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

СЕРДЮКОВ Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН и Института горного дела СО РАН. Основные научные интересы: геофизика, сейсморазведка, математическое моделирование, обработка сигналов, дифференциальные уравнения.

ДУЧКОВ Антон Альбертович – кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая миграция, регуляризация сейсмических данных с помощью Гауссовских волновых пакетов, микросейсмический мониторинг гидроразрыва.

*Статья поступила в редакцию 8 декабря 2025 г.,
одобрена после рецензирования 14 декабря 2025 г.,
принята к публикации 15 декабря 2025 г.*