

УДК 550.834

DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-4-139-151

Научная статья

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОЛЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Д.А. АЛЕКСЕЕВ^{1,2},
 Д.С. КУДИНОВ³,
 В.С. ПОТЫЛИЦЫН³,
 А.А. ГОНЧАРОВ^{1,4}

¹ Московский физико-технический институт (НИУ)

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

³ ФГАОУВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

⁴ ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», г. Салехард

С применением численного моделирования виброграмм на основе псевдослучайных (ШПС) и частотно-модулированных (ЧМ) квазигармонических свип-сигналов анализируются возможности помехоподавления при использовании управляющих ШПС в системах вибрационной сейсморазведки и дается оценка их эффективности по сравнению с традиционной схемой, основанной на корреляционной обработке виброграмм с частотно-модулированными гармоническими свип-сигналами. При этом для имитации помехи используются синтетические и экспериментальные ряды сейсмического шума. Полученные результаты позволяют видеть, что применение управляющих сигналов в форме ШПС с использованием деконволюции обеспечивает выигрыш в помехоподавлении перед стандартными для вибрационной сейсморазведки ЧМ сигналами, достигающий 10 раз и более.

Ключевые слова: *вибрационная сейсморазведка, управляющие сигналы, коэффициенты отражения, коррелограмма, импульсная переходная характеристика, псевдослучайные последовательности, шумоподобные сигналы, деконволюция*

ВВЕДЕНИЕ

В отличие от взрывного и невзрывного импульсного возбуждения упругих волн, при которых сейсмическая энергия передается в землю в виде коротких

Original article

MODEL ANALYSIS OF THE EFFICACY OF PSEUDORANDOM CODE SEQUENCES FOR SEISMIC WAVE GENERATION IN VIBROSEIS SYSTEMS

D.A. ALEKSEEV^{1,2}, D.S. KUDINOV³,
 V.S. POTYLITSYN³, A.A. GONCHAROV^{1,4}

¹ MOSCOW INSTITUTE OF PHYSICS AND TECHNOLOGY, DOLGOPRUDNY

² SCHMIDT INSTITUTE OF PHYSICS OF THE EARTH

³ SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY, KRASNOYARSK

⁴ SCIENTIFIC CENTER FOR THE STUDY OF THE ARCTIC, SALEKHARD

Using numerical simulation, we analyze noise cancellation capabilities of the vibroseis method employing pseudo-random (PSR) and frequency-modulated (FM) sweep signals, with primary focus on PSR efficiency compared to the conventional FM correlation-based approach. Both synthetic and field seismic records are used as noise to simulate interference with sweep-signal data. The results suggest that PSR sweeps along with deconvolution-based processing provide a significant (10-fold) improvement over the conventional FM sweeps in terms of signal-to-noise ratio.

KEYWORDS: *vibroseis, reflection coefficients, correlogram, impulse response, pseudorandom sequence, pseudonoise signals, sweep, deconvolution*

однократных импульсов длительностью от единиц до сотен миллисекунд с последующей регистрацией колебаний, отвечающих приходу отраженных волн [2], использование вибрационного источника предполагает более длительное (обычно более 10 с) воздействие, характер которого определяется управляющим свип-сигналом. В большинстве случаев используемые свип-сигналы имеют вид частотно-модулированных

квазигармонических сигналов с линейным изменением мгновенной частоты со временем в интервале от десятков до сотен Гц [11]. При этом, получаемые данные (виброграммы) представляют собой сложные интерференционные паттерны, требующие применения специальных средств обработки (фильтрация, корреляция, деконволюция) для выделения вступлений полезных волн, позволяющих визуализировать отражающие границы в исследуемом разрезе, и качество разделения отражений на коррелограммах не всегда оказывается достаточным [22].

Псевдослучайные сигналы, обладающие широкополосным спектром и статистическими характеристиками, делающими их близкими к белому гауссовскому шуму, называемые также шумоподобными сигналами (ШПС), в последние десятилетия нашли достаточно широкое применение в качестве носителей информации в системах радиосвязи, радиолокации, радиоастрономии в связи с высоким уровнем помехозащищенности [3, 5, 23]. Рядом авторов было предложено и реализовано применение ШПС-сигналов в геофизических системах импульсного электромагнитного зондирования, продемонстрировавшее ряд преимуществ перед традиционными подходами [4, 6, 7, 9, 14].

Вопросы, связанные с применением псевдослучайных (PRBS, шумоподобных, ШПС) сигналов в сейсморазведке, в последние годы нашли значительное отражение в научной литературе. В рамках реализации настоящего проекта мы рассмотрели серию работ, опубликованных в последние десятилетия и посвященных использованию ШПС в системах сейсморазведки. [20] провели численное моделирование псевдослучайных сигналов, создаваемых наземными сейсмическими источниками в рамках технологии Mini-SOSIE. **Продemonстрированы преимущества таких сигналов перед линейными вибросейсмическими свип-сигналами.** Sun et al. (2009) изучали применение двоичных и троичных кодовых последовательностей в сейсморазведке в целях улучшения разрешающей способности и отношения сигнал/шум (SNR). Оценки полученных автокорреляционных функций (АКФ) продемонстрировали преимущество троичных последовательностей в терминах SNR. В работах [16, 17] **рассматривается оптимизация выбора псевдослучайной последовательности для возбуждения сейсмических сигналов в вибрационной системе метода отраженных волн, минимизирующей сейсмическое воздействие на расположенные рядом здания.** Анализ предполагал расчет автокорреляционных функций и оптимизацию в терминах максимальных ускорений/смещений, развиваемых виброисточником; были продемонстрированы преимущества по сравнению со стандартным линейным свип-сигналом. В статье [18] **рассматривается реализация псевдослучайных свип-сигналов в вибросейсмических системах.** Предложен метод генерации таких сигналов на

основе M-последовательностей, полосового фильтра и цифро-аналогового преобразователя. Показано, что АКФ таких сигналов обладает хорошими свойствами, обеспечивающими достаточное качество регистрации с использованием существующей вибросейсмической аппаратуры. А. Жуков с соавторами (2017) исследовали возбуждение псевдослучайных свип-сигналов в одновременном режиме и отметили повышения качества разделения зарегистрированных сигналов. Хасан и Кострыгин (2018) путем сравнительного анализа корреляционных функций, соответствующих псевдослучайным импульсным последовательностям и последовательностям с линейным изменением периода следования импульсов, рассмотрена целесообразность применения псевдослучайных кодовых функций при кодоимпульсном накоплении колебаний для решения задач нефтегазовой сейсморазведки. Показано, что спектры главных максимумов корреляционных функций псевдослучайных импульсных последовательностей практически совпадают со спектрами единичных импульсов, используемых для построения этих последовательностей. Указанное обстоятельство свидетельствует о принципиальной возможности применения псевдослучайных последовательностей для решения задач, стоящих перед нефтегазовой сейсморазведкой. Однако, авторами отмечается, что псевдослучайные импульсные последовательности характеризуются повышенным уровнем помех корреляционного преобразования, вследствие чего применение псевдослучайных кодовых функций при проведении сейсмических наблюдений на нефть и газ становится не целесообразным.

Следует отметить, что в абсолютном большинстве проанализированных источников применение псевдослучайных сигналов обсуждается с точки зрения характеристик их автокорреляционной функции, а не реализации деконволюционных алгоритмов, что может открывать значительные перспективы с точки зрения задач, разрабатываемых в рамках настоящего проекта.

Мотивация использования псевдослучайных управляющих сигналов в вибрационной сейсморазведке обусловлена различными аспектами. Поскольку основной аппарат обработки вибросейсмических данных основан на расчете коррелограмм между управляющим сигналом и принятыми сейсмотрассами [25], для возможности выделения отдельных (не накладывающихся друг на друга во времени) отражений из сложного поля виброграммы, дающих приближенное изображение импульсной переходной характеристики разреза, необходимо, чтобы автокорреляционная функция (АКФ) управляющего сигнала имела вид, достаточно близкий к узкому (дельта-подобному) импульсу [11, 13, 19]. На практике это означает узость главного лепестка АКФ, а также малую амплитуду и быстрое затухание боковых лепестков.

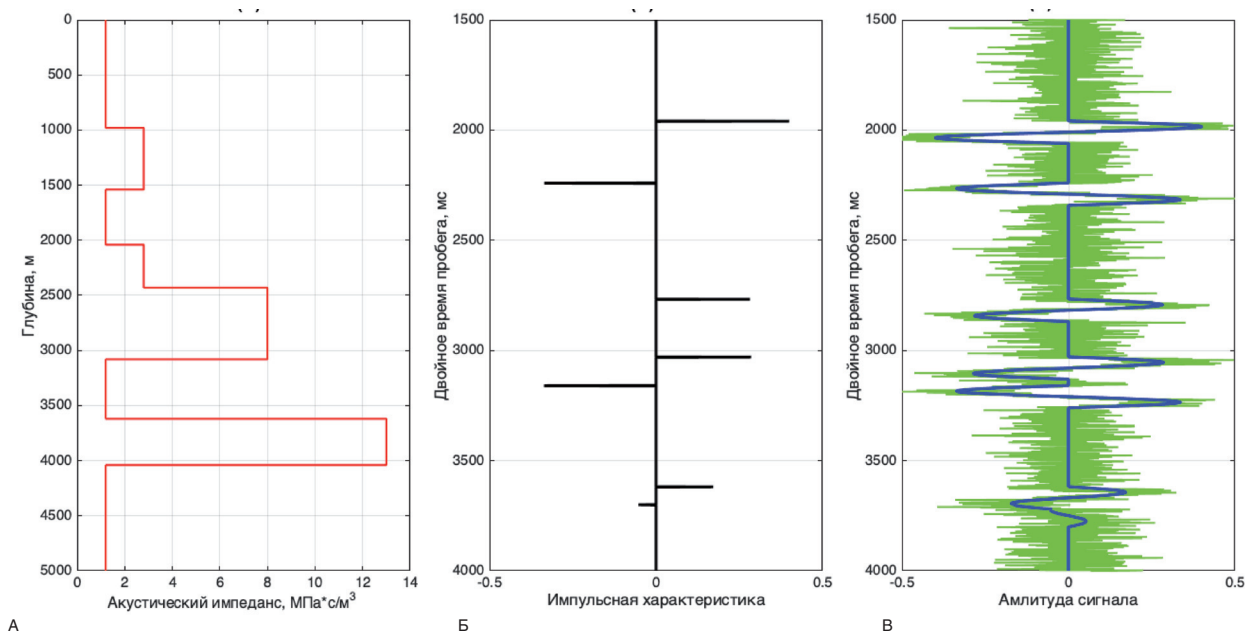


Рис. 1.

Синтетические данные, используемые для последующего моделирования сейсмограмм и реконструкции импульсной переходной характеристики: А – профиль акустической жесткости для рассматриваемой модели горизонтально-слоистой среды; смоделированная импульсная переходная характеристика системы “среда–установка” для разнеса источник–приемник 0 м, синтетическая сейсмограмма, отвечающая ИПХ, показанной на панели (Б) (синяя кривая) и результат ее зашумления аддитивным гауссовским шумом (зеленая кривая) (В)

Еще один фактор, требующий применения существенно отличных управляющих сигналов, связан с недавним внедрением высокопроизводительных вибросейсмических методов, реализующих синхронное излучение сейсмических волн несколькими источниками [12]. В рамках такого подхода регистрируются данные, содержащие значительный интерференционный шум, и использование отличающихся друг от друга псевдослучайных свип-сигналов на различных источниках дает возможность минимизировать такой шум и разделить волны от разных источников. Наконец, по причине сильной нерегулярности и, как следствие, отсутствия резонансных колебаний, применение ШПС при излучении сейсмических волн может оказаться востребованным для снижения сейсмического воздействия на грунт и объекты инфраструктуры, не допуская их повреждения и разрушения.

Таким образом, описанные выше аспекты определяют актуальность усовершенствования методов регистрации и обработки вибросейсмических сигналов, которые позволили бы улучшить соотношение сигнал/шум в области поздних времен регистрации. В настоящей работе в рамках численного моделирования виброграмм на основе псевдослучайных (ШПС) и частотно-модулированных гармонических свип-сигналов анализируются возможности помехоподавления при использовании управляющих ШПС и дается оценка их эффективности по сравнению с традиционной схемой, основанной на корреляционной

обработке виброграмм с частотно-модулированными гармоническими свип-сигналами. При этом для имитации помехи используются синтетические и экспериментальные ряды сейсмического шума.

ОЦЕНКА ПОМЕХОПОДАВЛЕНИЯ В РЕЖИМЕ ШПС

С целью оценки возможностей применения псевдослучайных последовательностей импульсов механической нагрузки, реализуемых с использованием вибрационного сейсмического источника, было проведено моделирование синтетических сейсмограмм ОГТ для набора управляющих сигналов в форме шумоподобных стандартных частотно-модулированных вибросейсмических сигналов с искусственным зашумлением, а затем выполнена реконструкция импульсной переходной характеристики для каждого из вариантов, и получена количественная характеристика ее погрешности относительно истинных значений.

На первом этапе моделирования было сформировано семейство импульсных переходных характеристик (ИПХ), отвечающих набору горизонтальных отражающих границ и учитывающих геометрическую конфигурацию системы источник–приемник, определяющую траекторию лучей и времена пробега отраженных волн для каждой из границ в горизонтально-слоистой модели среды. ИПХ представляет собой набор дельта-импульсов, отнесенных к временам пробега луча от источника до соответствующих отражающих границ, и, затем, к приемнику. Амплитуды

импульсов отвечают значениям коэффициента отражения для тех же границ, оцениваемых по контрасту акустических жесткостей (импедансов), а также учитывающих коэффициенты прохождения (преломления) во всех вышележащих слоях.

Сейсмограмма $s(t)$, регистрируемая сейсмоприемником в ответ на вибросейсмический (управляющий) сигнал $m(t)$, описывается сверточным соотношением [11]:

$$s(t) = m(t) * h(t), \tag{1}$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика (ИПХ) системы среда–установка, отражающая распределение коэффициентов отражения по разрезу и представляющая собой отклик на входное воздействие в форме дельта-функции, а знак * означает операцию свертки.

Переходя к дискретной постановке и полагая, что входное воздействие $m(t)$ задано в виде последовательности прямоугольных импульсов, а ИПХ соответствует не дельта-функции, а одиночному импульсу длительности Δt , т.е. функции m , h и s представляют собой наборы отсчетов с шагом дискретизации Δt :

$$\begin{aligned} m &= \{m_i\}, i = \overline{1, N}; h = \{h_i\}, i = \overline{1, M}; \\ s &= \{s_j\}, j = \overline{1, N + M - 1}, \end{aligned} \tag{2}$$

соотношение (1) можно записать в виде системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\sum_i m_i \cdot h_{j-i} = s_j. \tag{3}$$

В матричной форме операцию моделирования сейсмограммы можно представить как

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ m_2 & m_1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & m_2 & \ddots & \ddots & \vdots \\ m_N & \vdots & \ddots & m_1 & 0 \\ 0 & m_N & \ddots & m_2 & m_1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & m_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & m_N & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & m_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \\ s_{N+1} \\ \vdots \\ s_{N+M-1} \end{pmatrix} \tag{4}$$

Таким образом, по построенным последовательностям отсчетов управляющего сигнала вычисляется их свертка с импульсной переходной характеристикой системы среда–установка, которая затем используется для имитации зарегистрированного сигнала. Для

оценки эффективности помехоподавления на смоделированную сейсмограмму $s(t)$, представленную в правой части системы (4), накладывается аддитивный шум $n(t) \div s_n(t) = s(t) + n(t)$.

Для целей настоящего исследования, направленного на сравнение качества реконструкции ИПХ при использовании различных свип-сигналов, был выполнен расчет управляющих свип-сигналов в форме псевдослучайных последовательностей (ШПС), а также ЧМ квазигармонического сигнала. ШПС-сигналы задавались в виде двоичных M-последовательностей, состоящих из элементарных импульсов прямоугольной формы, с равномерным распределением с использованием алгоритма генерации M-последовательностей, основанного на теории конечных полей Галуа и принципах линейных цифровых автоматов, примененного авторами ранее в задаче зондирования становлением поля [6, 9]. Рассматривалось два варианта двоичной последовательности – длиной 2^{12} импульсов (длительность одного импульса – 5 мс) и 2^9 импульсов (длительность одного импульса – 40 мс) при одинаковой общей длительности, составляющей около 20 с. Для каждого из этих вариантов с помощью оконного фильтра был получен сглаженный аналог, являющийся более реалистичным с точки зрения практической реализации вибрационным источником, и позволяющий оценить степень ожидаемого ухудшения помехозащищенности, связанного с сужением спектра. Управляющие ШПС-сигналы, а также соответствующие им синтетические сейсмограммы в сопоставлении с накладываемым шумом приводятся на рис. 2а и 3а,в.

Кроме того, для сравнения с технологией стандартной вибрационной сейсморазведки, был имитирован частотно-модулированный управляющий (свип)-сигнал с мгновенной частотой, линейно изменяющейся в интервале от 20 до 200 Гц (рис. 4А). Временные ряды управляющих сигналов (а также сейсмограмм и шума, моделируемых на последующем этапе анализа) дискретизировались по времени с шагом 1 мс.

На следующем этапе выполнялась реконструкция ИПХ по зашумленным сейсмограммам в режимах деконволюции и кросс-корреляции для набора сигналов и реализации случайного шума с гауссовским распределением и различной средней амплитудой. Определение ИПХ $h(t)$ из уравнения свертки (5) с зашумленной правой частью

$$m(t) \times h(t) = s_n(t) \tag{5}$$

дает возможность получить оценку ИПХ $\tilde{h}(t)$, содержащую некоторую погрешность относительно истинной ИПХ $h(t)$. Задача состоит в максимальном снижении этой погрешности, то есть максимальном приближении $\tilde{h}(t)$ к $h(t)$.

Для решения уравнения свертки, т.е., выполнения деконволюции, в дискретной постановке требуется

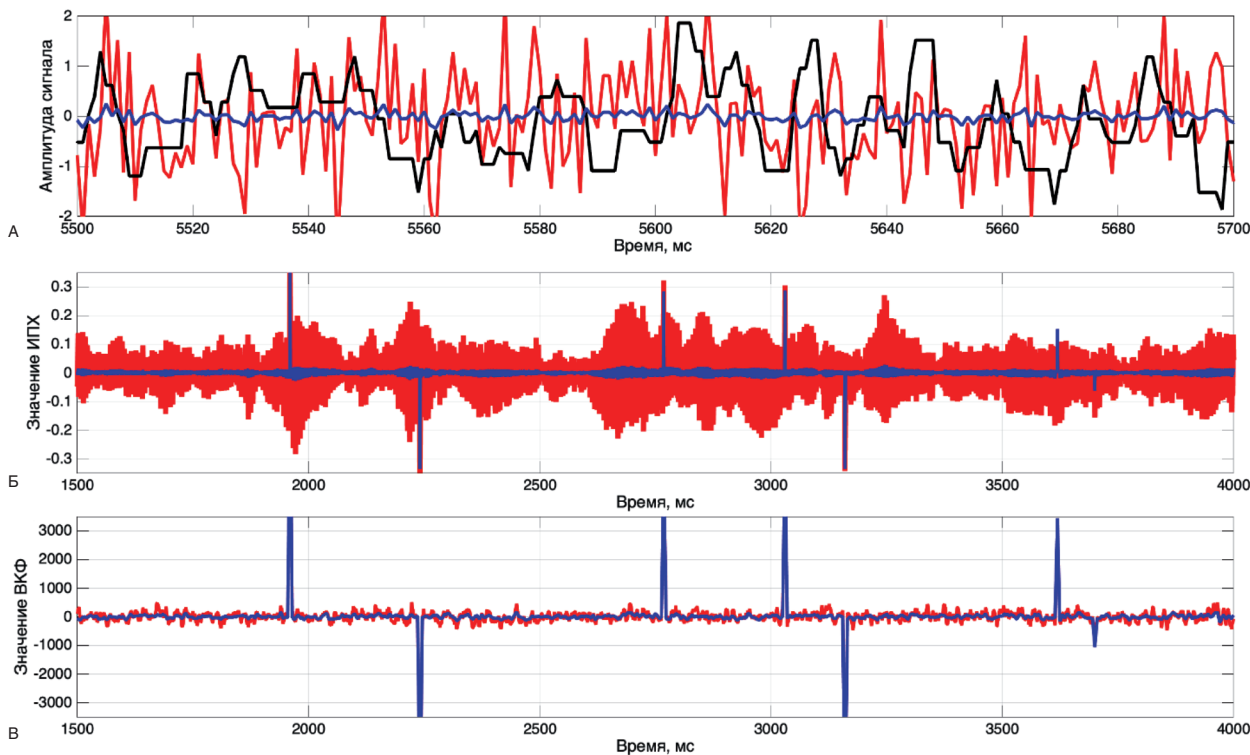


РИС. 2.

Реконструкция ИПХ среды по синтетической сейсмограмме с использованием управляющего сигнала в форме ШПС с длительностью импульса 5 мс: А – фрагмент синтетической сейсмограммы в режиме управляющего сигнала ШПС (черная кривая), аддитивный гауссов шум с SNR –4 дБ (красная кривая) и 16 дБ (синяя кривая); Б – результаты деконволюции зашумленных данных при SNR – 4 дБ (красная кривая) и 16 дБ (синяя кривая); В – оценка ИПХ методом кросс-корреляции (вычисления ВКФ) управляющего сигнала и зарегистрированной (зашумленной) сейсмограммы для тех же значений SNR

решать переопределенную СЛАУ (4) с зашумленной правой частью, что может быть сделано, например, с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [8]. Применение МНК позволяет сократить вычислительные затраты, обеспечивая переход от СЛАУ, в которой матрица левой части A имеет размер $(N+M-1) \times M$, $N \gg M$, к нормальной СЛАУ с матрицей $A^T \cdot A$ размером $M \times M$, где T означает транспонирование. В результате рассчитывается набор значений ИПХ:

$$\tilde{b} = (A^T \cdot A)^{-1} A^T \cdot s_n \quad (6)$$

Результаты деконволюции в режиме ШПС представлены на рис. 2б для двух уровней зашумления синтетическим гауссовским шумом, соответствующим отношению сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) –4 дБ (среднеквадратичное значение шума несколько превосходит полезный сигнал, красная кривая) и 16 дБ (среднеквадратичное значение шума составляет менее 20% от среднеквадратичного значения полезного сигнала, синяя кривая).

В дополнение к деконволюции, реконструкция ИПХ выполнялась также методом кросс-корреляции,

т.е., расчета функции взаимной корреляции (ВКФ), обеспечивающим приближенное определение времен и соотношения амплитуд, отвечающих пикам ИПХ, и традиционно применяемым для обработки вибро-сейсмических данных. В нормированном виде ВКФ управляющего сигнала m и принятой сейсмограммы s вычисляется согласно формуле:

$$B_{ms}(\tau) = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \cdot s_{j-\tau}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N m_i^2 \cdot \sum_{i=1}^N s_i^2}} \quad (7)$$

Полученные в соответствии с (7) временные зависимости ВКФ для различных режимов работы источника показаны на рис. 2в и 3в.

Хотя на практике амплитуды и времена пиков истинной $b(t)$ не известны, на этапе модельных исследований погрешность реконструкции ИПХ можно характеризовать на качественном уровне, определяя количество выявляемых пиков ИПХ и их положение на оси времени, сравнивая результаты деконволюции/корреляции с истинной ИПХ. Такой подход может быть использован для оценки степени подавления

шума и сравнения качества реконструкции ИПХ при различных параметрах имитации режима ШПС и режима ЧМ свип-сигнала, используемых для возбуждения упругих колебаний вибрационным источником.

С целью более широкого анализа, включающего большой набор реализаций шума, описанный выше численный эксперимент был повторен в трех режимах (одиночный импульс длительностью 100 мс, ШПС с прямоугольными импульсами длительностью 5 мс и ЧМ свип-сигнал), для массива из 23 синтетических сейсмотрасс, образующих сейсмограмму ОГТ, и сегментов шума, взятых из экспериментальных данных Геологической службы США (<https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/npra/>) и наложенных на каждую из имитированных сейсмотрасс. При этом рассматривалось три уровня зашумления (А, В, С), отличающихся масштабированием по амплитуде (с коэффициентами 1, 2.5 и 10, соответственно). В силу значительной вариабельности шумов во времени, а также от трассы к трассе, приводить усредненные значения SNR для рассмотренных сейсмограмм представляется нецелесообразным, однако получить представление о степени выраженности шума на фоне полезного сигнала можно, обратившись к верхним панелям на рис. 5–7, иллюстрирующим имитированные сейсмотрассы и накладываемый шум.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты реконструкции переходных характеристик по зашумленным синтетическим данным в режимах ШПС и ЧМ свип-сигналов представлены на рис. 2б,в, 3в, 4б,в для одноканальной сейсмотрассы с синтетическим шумом различной среднеквадратичной амплитуды (отношения сигнал/шум) и на нижних панелях рис. 5–7 для семейства из 23 трасс сейсмограммы ОГТ, рассчитанных при разносах источник–приемник в диапазоне 0–3200 м, и возмущенных различными реализациями шума, сформированными на основе реальных сейсмических данных (<https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/npra/>). Можно видеть, что в режиме ШПС с прямоугольными импульсами длительностью 5 мс (рис. 2б), пики переходной характеристики, соответствующие приходам полезного сигнала, связанного с целевыми отражениями, восстанавливаются с достаточно высокой точностью даже в случае очень значительных шумов (SNR менее 0 дБ), хотя фоновый уровень погрешности вне пиков в этом случае остается весьма высоким (до 50–60% от амплитуды пиков). При SNR около 16 дБ, точность деконволюции существенно возрастает, амплитуды пиков оцениваются с ошибкой порядка первых процентов, ложных пиков при этом не наблюдается.

Интересным результатом является высокая точность решения, полученного на основе ВКФ для обоих уровней зашумления, характеризуемая точным

определением времен пиков и низким уровнем боковых лепестков вне их (рис. 2в), что свидетельствует о близости АКФ рассматриваемого в данном примере ШПС-сигнала к оптимальной.

Сопоставление результатов деконволюции для 4 различных ШПС сигналов (импульсы длительностью 5 и 40 мс, со сглаживанием и без) при зашумлении с SNR 16 дБ, не обнаруживает радикальных отличий, демонстрируя высокий уровень точности во всех вышеуказанных случаях (рис. 3в). Основные проявления погрешности связаны с наличием боковых лепестков решения между пиками ИПХ; при этом средняя амплитуда фоновой погрешности минимальна для случая 5 мс–импульсов без сглаживания, и максимальна для 40 мс–импульсов со сглаживанием.

Переходя к анализу деконволюции стандартного линейного частотно-модулированного свип-сигнала (рис. 4а), можно отметить неудовлетворительную точность восстановления ИПХ при уже при SNR 16 дБ и ниже (красная область на рис. 4б). Относительно приемлемая точность с выделением всех пиков наблюдается лишь при SNR свыше 30 дБ (синяя кривая на рис. 4б). Таким образом, отмечается многократное снижение точности при одинаковом уровне зашумления по сравнению с режимом ШПС (рис. 2б). В то же время, в рассмотренном примере с ЧМ свип-сигналом коррелограмма оказывается практически нечувствительной к амплитуде накладываемого шума и позволяет определить положения пиков ИПХ (рис. 4в), хотя и с существенно худшим разрешением по времени по сравнению с режимом ШПС (рис. 2в).

Анализ результатов деконволюции и корреляционной обработки синтетических сейсмограмм ОГТ в режимах ШПС (прямоугольные импульсы длительностью 5 мс) и ЧМ квазигармонического сигнала (20–200 Гц) в сопоставлении с режимом одиночных 100 мс- импульсов, позволяет отметить следующие основные закономерности (нижние панели на рис. 5–7).

При уровне зашумления А режим одиночных импульсов позволяет на большинстве сейсмотрасс надежно выделять вступления, отвечающие 6 верхним отражающим границам (рис. 5б), однако 7 граница остается практически не проявленной на фоне помехи; деконволюция виброграммы в режиме ЧМ свип-сигнала дает достаточно точную реконструкцию ИПХ с правильным расположением и амплитудами пиков примерно для половины сейсмотрасс; деконволюция виброграммы в режиме ШПС свип-сигнала обеспечивает близкое к идеальному восстановление сейсмограммы, даже для трасс с весьма значительным уровнем шума, сопоставимым с или превышающим полезный сигнал.

При уровне зашумления В в режиме одиночных импульсов приблизительно на половине сейсмотрасс выделяется 3–4 вступления, в то время как оставшиеся

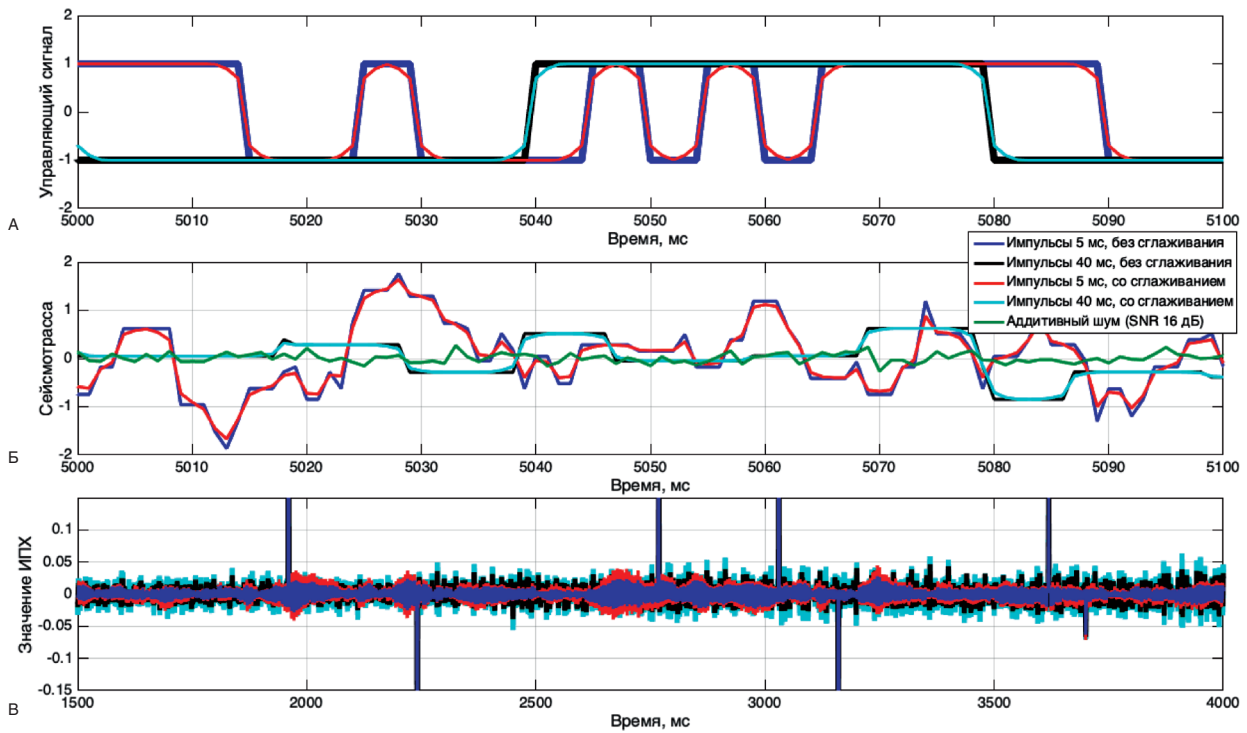


Рис. 3.

Сравнение качества реконструкции ИПХ среды методом деконволюции по зашумленным синтетическим сейсмотрассам (SNR ~ 16 дБ), имитированным с использованием управляющего сигнала в виде ШПС с различной длительностью и формой импульсов: А – фрагмент ШПС свип-сигналов с прямоугольными (синий, черный) и сглаженными (голубой, красный) импульсами длительностью 5 мс (синий, красный) и 40 мс (голубой, черный); Б – фрагмент имитированных сейсмотрасс (цвета соответствуют управляющим сигналам, показанным на панели а); зеленой кривой показан накладываемый синтетический шум; В – Результат деконволюции для четырех рассматриваемых сигналов

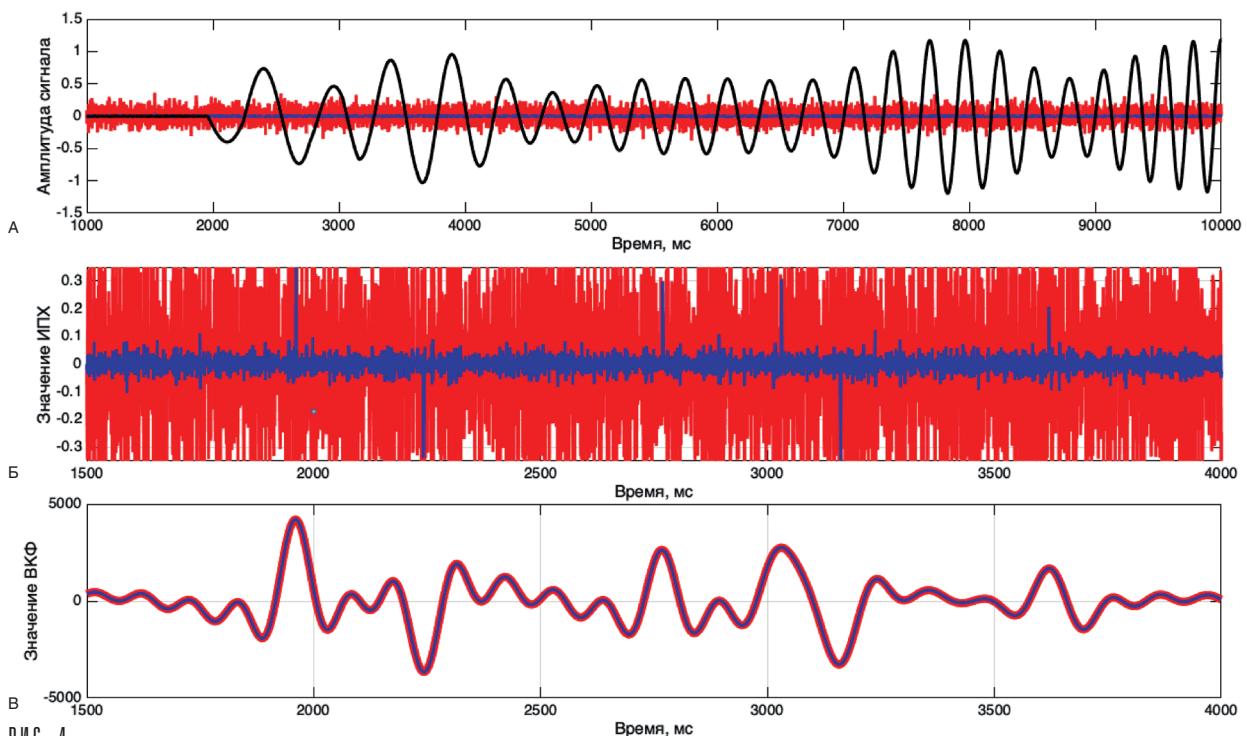


Рис. 4.

Реконструкция ИПХ среды по синтетической сейсмограмме в режиме ЧМ квазигармонического свип-сигнала (2–200 Гц) общей длительностью 20 с: А – фрагмент синтетической сейсмотрассы (черная кривая), аддитивный гауссов шум с SNR 16 дБ (красная кривая) и 36 дБ (синяя кривая); Б – результаты деконволюции зашумленных данных для SNR шума 16 дБ (красная кривая) и 36 дБ (синяя кривая); В – оценка ИПХ методом кросс-корреляции (вычисления ВКФ) управляющего сигнала и зарегистрированной (зашумленной) сейсмотрассы для тех же значений SNR

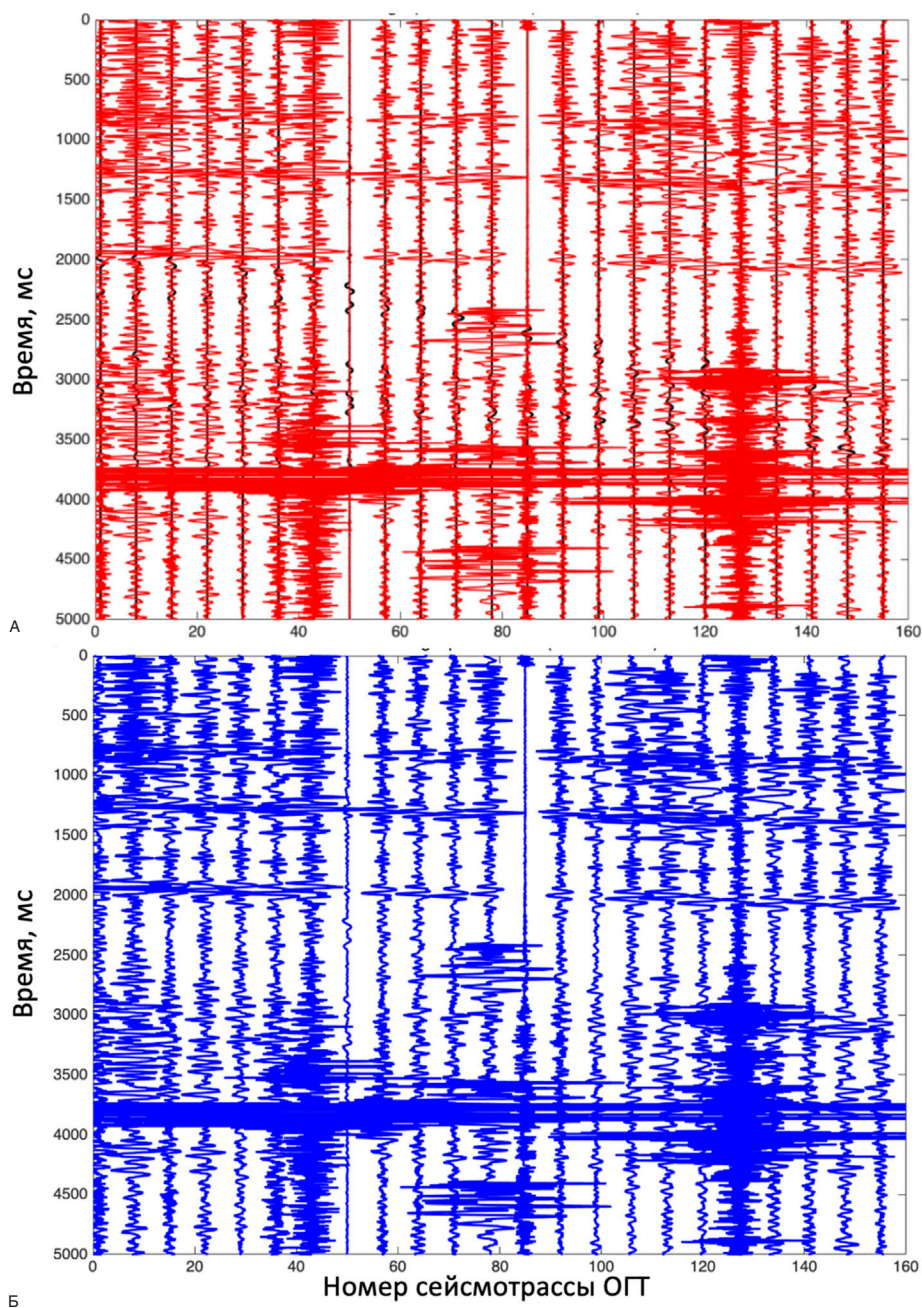


Рис. 5.

А – синтетическая сейсмограмма ОГТ в режиме одиночного импульса (черные кривые) и аддитивный шум (вариант С, красные кривые); Б – результат зашумления

вступления маскированы помехой. Другая половина сейсмотрасс характеризуется выраженным уровнем шума, затрудняющим выделение вступлений; деконволюция виброграммы в режиме ЧМ свип-сигнала для большинства трасс позволяет определить времена и амплитуды отражений для 4–5 верхних границ, в то время как 6 граница выделяется на небольшом количестве трасс, а идентифицировать 7-ю оказывается практически невозможно; в режиме ШПС свип-сигнала

деконволюция виброграммы сохраняет возможность точного восстановления ИПХ для всех рассмотренных трасс за исключением единственной, характеризующейся экстремально низким значением SNR.

Наконец, при уровне зашумления С режим одиночных импульсов не позволяет выделить полезные вступления практически ни на одной трассе в составе рассматриваемой сейсмограммы (рис. 5Б); деконволюция виброграммы в режиме ЧМ свип-сигнала

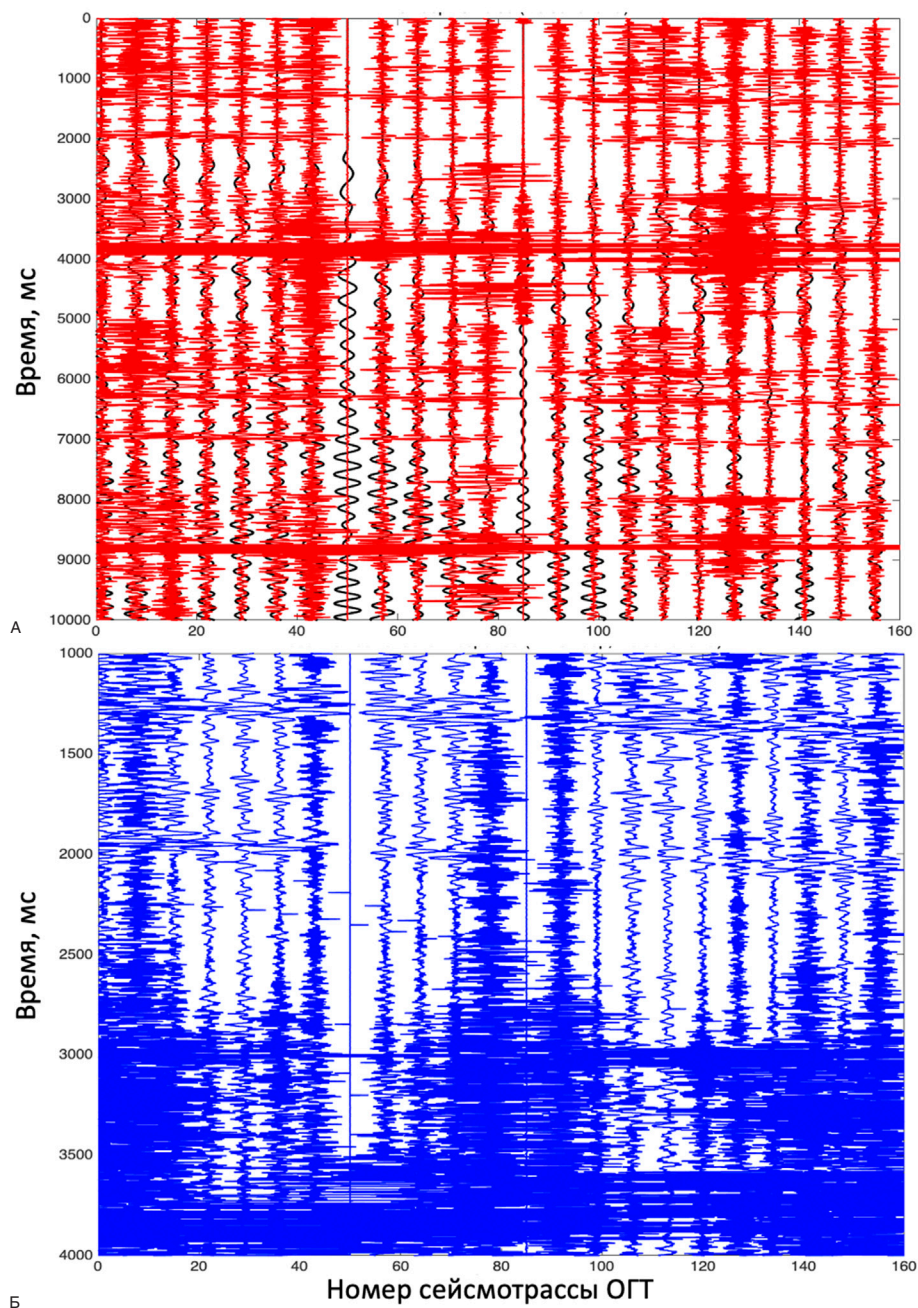


Рис. 6.

А – синтетическая сейсмограмма ОГТ в режиме частотно-модулированного свип-сигнала (черные кривые) и аддитивный шум (вариант С, красные кривые); Б – результат деконволюции синтетической сейсмограммы ОГТ в режиме частотно-модулированного свип-сигнала с добавлением аддитивного шума (вариант С)

позволяет получить пики ИПХ лишь для 2–3 верхних отражений, и только на небольшой части трасс (рис. 6Б); деконволюция виброграммы в режиме ШПС свип-сигнала остается точным, за исключением отдельной трассы с экстремальным зашумлением, упомянутой в предыдущем пункте (рис. 7Б).

Таким образом, по совокупности полученных модельных результатов, можно отметить, что результаты деконволюции и корреляции обнаруживают суще-

ственно различный уровень погрешности, достигаемый в режимах ШПС и ЧМ. Применение управляющих сигналов в форме ШПС с использованием деконволюции обеспечивает выигрыш в помехоподавлении перед стандартными для вибрационной сейсморазведки ЧМ сигналами, достигающий 10 раз и более. В рамках проведенного эксперимента наилучшее качество деконволюции было отмечено при использовании 5 мс-импульсов с прямыми фронтами,

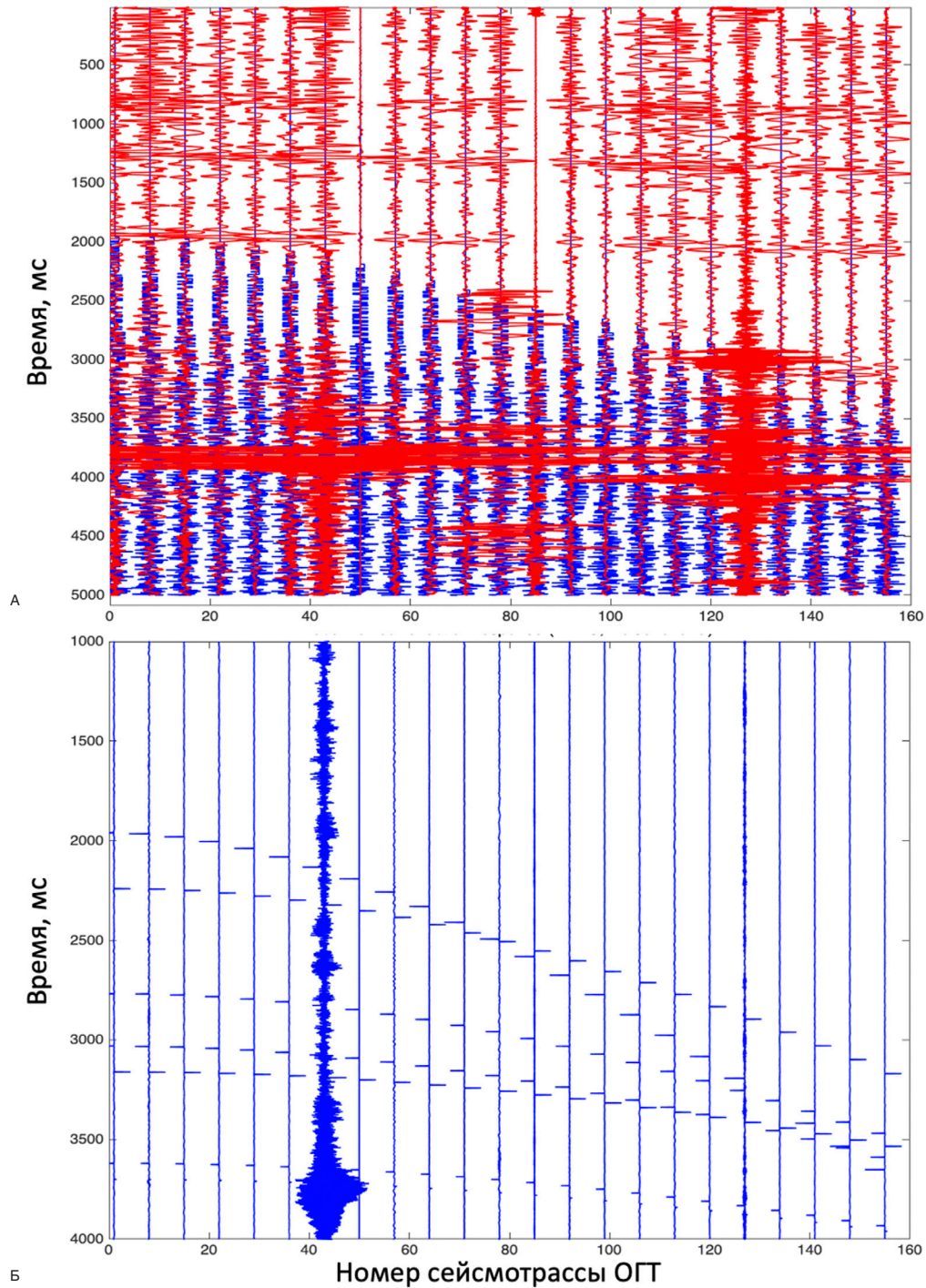


Рис. 7.

А – синтетическая сейсмограмма ОГТ в режиме псевдослучайной кодовой последовательности (ШПС, синие кривые) и аддитивный шум (вариант С, красные кривые); Б – результат деконволюции синтетической сейсмограммы ОГТ в режиме ШПС с добавлением аддитивного шума (вариант С)

однако ухудшение результата при увеличении длительности импульсов и сглаживании их фронтов оказалось незначительным. Нужно отметить, что переход на ШПС-сигналы оставляет возможность использова-

ния аппарата корреляционной обработки, результаты которого также демонстрируют значительное преимущество перед соответствующими результатами в режиме ЧМ-свип в терминах локализации пиков ВКФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках конволюционной модели сейсмотрассы проведено сравнение помехоподавления для синтетических зашумленных данных вибрационной сейсморазведки, полученных при использовании ШПС и ЧМ свип-сигналов с применением деконволюции и кросс-корреляции. При этом для имитации помехи использовались синтетические и экспериментальные ряды сейсмического шума.

В рамках проведенного численного эксперимента показано, что переход от режима ЧМ свип-сигнала к режиму ШПС с существенно большим количеством коротких импульсов с последующим применением деконволюции и/или кросс-корреляции позволяет существенно расширить неискаженный шумами временной интервал восстанавливаемой переходной характеристики, а значит – увеличить глубину и повысить надежность сейсморазведочных исследований.

На взгляд авторов, несмотря на потенциальные трудности с реализацией режима ШПС в вибрационных источниках, рассматриваемое направление имеет определенные перспективы в связи с рядом ожидаемых преимуществ, которые могут определить дальнейшее развитие и усовершенствование технологий вибрационной сейсморазведки. Представляется, что при оптимальном выборе параметров ШПС и пространственной конфигурации системы наблюдения можно рассчитывать на создание такой системы вибрационной сейсморазведки, которая при меньшем энергопотреблении сможет конкурировать с самыми мощными, при этом, обладая экологичностью и обеспечивая возможность синхронного использования нескольких источников на одной площади, не мешающих работе друг друга. Отдельного внимания заслуживает анализ возможности выделения и интерпретации слабых сейсмoeлектрических сигналов, также способных дать информацию об электрических, механических и фильтрационных свойствах изучаемого разреза [Potylitsyn et al., 2021; Алексеев и др., 2022]. Таким образом, как теоретический анализ возможностей применения ШПС, так и создание алгоритмической, программной и аппаратурной базы для внедрения подобной технологии, являются весьма актуальными направлениями развития разведочной геофизики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 22-27-20103.

ЛИТЕРАТУРА

1. АЛЕКСЕЕВ Д.А., ГОХБЕРГ М.Б., ГОНЧАРОВ А.А., ПЛИСС А.О. Численное моделирование сейсмoeлектрических полей, возбуждаемых

импульсным сейсмическим источником // Вестник РАЕН. 2022. №4. С. 69–79. DOI: 10.52531/1682-1696-2022-22-4-69-79.

2. БОГАНИК Г.Н., ГУРВИЧ И.И. Сейсморазведка: учеб. для вузов. Тверь: Изд-во АИС. 2006. 744 с.
3. ВАРАКИН Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь. 1985. 384 с.
4. ВЕЛИКИН А.Б., ВЕЛИКИН А.А. Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ // Разведка и охрана недр. 2016. № 2. С. 47–54.
5. ГАНТМАХЕР В.Е., БЫСТРОВ Н.Е., ЧЕБОТАРЕВ Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и техника. 2006. 400 с.
6. ГОНЧАРОВ А.А., АЛЕКСЕЕВ Д.А., КОШУРНИКОВ А.В., ГУНАР А.Ю., СЕМИЛЕТОВ И.П., ПУШКАРЕВ П.Ю. Применение псевдослучайных кодовых последовательностей для повышения эффективности зондирования становлением поля в ближней зоне на арктическом шельфе // Физика Земли. 2022. № 5. С. 158–170.
7. ИЛЬЧЕВ П.В., БОБРОВСКИЙ В.В. Применение шумоподобных сигналов в системах активной геoeлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 2. С. 5–19.
8. ЖДАНОВ М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный Мир. 2007. 712 с.
9. СВЕТОВ Б.С., АЛЕКСЕЕВ Д.А., АГЕЕВ В.В., КАРИНСКИЙ С.Д., ЯКОВЛЕВ А.Г. Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // Геофизика. 2012. № 1. С. 52–60.
10. ХАСАН Р.Е., КОСТРЫГИН Ю.П. Исследование возможности и целесообразности применения псевдослучайных кодовых функций при кодоимпульсном накоплении колебаний для решения задач нефтегазовой сейсморазведки // Геофизические технологии. 2018. 1. С. 39–50. DOI:10.18303/2619-1563-2018-1-4.
11. ШНЕЕРСОН М.Б., ПОТАПОВ О.А., ГРОДЗЕНСКИЙ В.А., ИНОЗЕМЦЕВ А.Н., ЛЕВ И.С., ЖУКОВ А.П. Вибрационная сейсморазведка / Под ред. М.Б. Шнеерсона. М.: Недра. 1990. 240 с.
12. BAGAINI C. Acquisition and processing of simultaneous vibroseis data. Geophysical Prospecting. 2010. N58. P. 81–100.
13. DEAN T. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis surveys // Geophysical Prospecting. 2014. N62. P. 50–74. DOI: 10.1111/1365-2478.12074.
14. HEIWIG S.L. VIBROTEM ein vergleich zu long-offset transient electromagnetic (LOTEM) in theorie und praxis. Inaugural dissertation zur erlangung des doktorgrades der mathematisch-naturwissenschaftlichen fakultat der universitat zu Koln. 1999.
15. POTYLITSYN V., KUDINOV, D., ALEKSEEV D., KOKHONKOVA E., KURKOV, S., EGOROV I., PLISS A.

- Study of the seismoelectric effect of the second kind using molecular sensors. *Sensors*. 2021. 21. 2301.
16. SCHOLTZ P. Optimum pseudo-random sweeps for vibratory surveys to reduce risk of damaging buildings. SEG Las Vegas Annual Meeting. 2012. DOI: 10.1190/segam2012-0623.1.
 17. SCHOLTZ P. Pseudo-random sweeps for built-up area seismic surveys // *The Leading edge*. 2013. №32. Vol. 3. P. 276–282. DOI: 10.1190/tle32030276.1.
 18. SHE X. Design and realization of pseudo random seismic sweeping signal in vibroseis. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011. P. 5217–5219. DOI: 10.1109/ICCEENG.2011.6057642.
 19. SHERIFF R.E., GELDART L.P. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press. 1995.
 20. STRONG S. HEARN S. Numerical modelling of pseudo-random land seismic sources. ASEG Extended Abstracts. 2004. N1. P. 1–4. DOI: 10.1071/ASEG2004-ab142.
 21. SUN F., WANG Z.-R., CHEN Z.-B., FAN D.-D. Pseudorandom sweeping and system testing for seismic vibrator. *Guangxue Jingmi Gongcheng // Optics and Precision Engineering*. 2009. N17. P. 2569–2575.
 22. VEDANTI N., GUPTA L., SINGH V., VADAPALLI U., BABU NAIK R.T., VASUDEVAN G., KISHORE P. Problems with the standard vibroseis deconvolution: some practical solutions, *Exploration Geophysics*. 2020. DOI: 10.1080/08123985.2020.1825913.
 23. ZEPERNICK H.-J., FINGER A. *Pseudo Random Signal Processing. Theory and Application*. Wiley. 2005. 432 p.
 24. ZHUKOV A., KOROTKOV I., SIDENKO E., NEKRASOV I., GRIDIN P., GALIKEEV T. Simultaneous pseudo-random shuffle-sweep generation and increased seismic data acquisition productivity. SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2017. DOI: 10.1190/segam2017-17643246.1.
 25. YILMAZ Ö. *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists. 2001.
 26. <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/npra/>
- employing noise-like signals. *Razvedka i okhrana nedr*. 2016;2:47–54. (In Russian).
5. GANTMAKHER V.E., BYSTROV N.E., CHEBOTAREV D.V. *Noise-Like Signals. Analysis, Synthesis, Processing*. Saint Petersburg: Nauka i tekhnika. 2006:400. (In Russian).
 6. GONCHAROV A.A., ALEKSEEV D.A., KOSHURNIKOV A.V., GUNAR A.YU., SEMILETOV I.P., PUSHKAREV P.YU. Using Pseudo-Random Code Sequences for Improving the Efficiency of Near-Field Transient Electromagnetic Sounding on the Arctic Shelf. *Fizika Zemli*. 2022;58;(5):744–754. (In Russian).
 7. ILYICHEV P.V., BOBROVSKY V.V. Application of pseudonoise signals in systems of active geoelectric exploration (numerical modeling and field data). *Seismicheskiye priborny*. 2014;50;(2):5–19. (In Russian).
 8. ZHDANOV M.S. *Theory of inverse problems and regularization in geophysics*. Moscow: Nauchnyy Mir. 2007:712. (In Russian).
 9. SVETOV B.S., ALEKSEEV D.A., AGEEV V.V., KARINSKY S.D., YAKOVLEV A.G. Pseudonoise signals application in transient electromagnetics. *Geofizika*. 2012;1:52–60. (In Russian).
 10. KHASAN R.E., KOSTRYGIN YU.P. Possibility and applicability of pseudo-random code functions in impulse-code seismic concentration to oil and gas seismology problem-solving research. *Geofizicheskiye tekhnologii*. 2018;1:39–50. DOI: 10.18303/2619-1563-2018-1-4. (In Russian).
 11. SHNEERSON M.B., POTAPOV O.A., GROZDENSKY V.A., INOZEMTSEV A.N., LEV I.S., ZHUKOV A.P. *Vibrational seismics*. Moscow. Nedra. 1990. 240 p. (In Russian).
 12. BAGAINI C. Acquisition and processing of simultaneous vibroseis data. *Geophysical Prospecting*. 2010;58:81–100.
 13. DEAN T. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis surveys. *Geophysical Prospecting*. 2014;62:50–74. doi: 10.1111/1365-2478.12074.
 14. HELWIG S.L. *VIBROTEM ein vergleich zu long-offset transient electromagnetic (LOTEM) in theorie und praxis*. Inaugural dissertation zur erlangung des doktorgrades der mathematisch-naturwissenschaftlichen fakultat der universitat zu Koln. 1999.
 15. POTYLITSYN V., KUDINOV, D., ALEKSEEV D., KOKHONKOVA E., KURKOV, S., EGOROV I., PLISS A. Study of the seismoelectric effect of the second kind using molecular sensors. *Sensors*. 2021;21: 2301.
 16. SCHOLTZ P. Optimum pseudo-random sweeps for vibratory surveys to reduce risk of damaging buildings. SEG Las Vegas Annual Meeting. 2012. DOI: 10.1190/segam2012-0623.1.
 17. SCHOLTZ P. Pseudo-random sweeps for built-up area seismic surveys. *The Leading edge*. 2013;32;(3):276–282. DOI: 10.1190/tle32030276.1

REFERENCES

1. ALEKSEEV D.A., GOKHBERG M.B., GONCHAROV A.A., PLISS A.O. Numerical simulation of the seismoelectric field generated by the impulse seismic source. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2022;4:69–79. DOI: 10.52531/1682-1696-2022-22-4-69-79. (In Russian).
2. BOGANIK G.N., GURVICH I.I. Seismic exploration. Tver. AIS. 2006:744. (In Russian).
3. VARAKIN L.E. *Communication systems with noise-like signals*. Moscow. Radio i svyaz'. 1985:384. (In Russian).
4. VELIKIN A.B., VELIKIN A.A. A new correlation-based time-domain electromagnetics method CTEM,

18. SHE X. Design and realization of pseudo random seismic sweeping signal in vibroseis. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011:5217–5219. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057642.
19. SHERIFF R.E., GELDART L.P. Exploration Seismology. Cambridge University Press. 1995.
20. STRONG S., HEARN S. Numerical modelling of pseudo-random land seismic sources. *ASEG Extended Abstracts*. 2004;1:1–4. DOI: 10.1071/ASEG2004ab142.
21. SUN F., WANG Z.-R., CHEN Z.-B., FAN D.-D. Pseudorandom sweeping and system testing for seismic vibrator. *Guangxue Jingmi Gongcheng. Optics and Precision Engineering*. 2009;17:2569–2575.
22. VEDANTI N., GUPTA L., SINGH V., VADAPALLI U., BABU NAIK R.T., VASUDEVAN G., KISHORE P. Problems with the standard vibroseis deconvolution: some practical solutions, *Exploration Geophysics*. 2020. DOI: 10.1080/08123985.2020.1825913.
23. ZEPERNICK H.-J., FINGER A. Pseudo Random Signal Processing. Theory and Application. Wiley. 2005:432.
24. ZHUKOV A., KOROTKOV I., SIDENKO E., NEKRASOV I., GRIDIN P., GALIKEEV T. Simultaneous pseudo-random shuffle-sweep generation and increased seismic data acquisition productivity. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2017. DOI: 10.1190/segam2017-17643246.1.
25. YILMAZ Ö. Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists. 2001.
26. <https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/npra/>

Алексеев Дмитрий Александрович,

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Московского физико-технического института, Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

☎ 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,
 Институтский пер., д. 9,
 141701, Moscow region, Dolgoprudny, Institutsky lane, 9
 e-mail: alexeevgeo@gmail.com, alekseev.da@mipt.ru

Кудинов Данил Сергеевич,

к.т.н., доцент Сибирского федерального университета

☎ 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79/10,
 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 79/10,
 e-mail: kudinovdaniil@yandex.ru

Потылицын Вадим Сергеевич,

преподаватель Сибирского федерального университета

☎ 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79/10,
 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 79/10,
 e-mail: markuss86@mail.ru

Гончаров Алексей Алексеевич,

аспирант, инженер, аспирант Московского физико-технического института, младший научный сотрудник Научного центра изучения Арктики

☎ 629008, Тюменская обл., Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, д. 20, офис 203,
 629008, Tyumen region, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Salekhard, st. Respubliki, 20, office 203,
 e-mail: goncharov.aa@phystech.edu