

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Ван Жуйчжэ

**Повышение эффективности вибрационной
сейсморазведки на основе оптимизации управляющих
свип-сигналов**

1.6.9. Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научные руководители: *Жуков Александр Петрович, доктор технических наук*
Коротков Илья Петрович, кандидат технических наук

Официальные оппоненты: *Тихоцкий Сергей Андреевич, доктор физико-математических наук, академик РАН, ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, директор*

Кострыгин Юрий Петрович, доктор технических наук, ООО «Новоросморгео», заместитель генерального директора по научной работе

Каплан Самуил Абрамович, кандидат технических наук, ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт, отдел методического сопровождения обработки данных сейсморазведки и каротажа, заведующий отделом

Защита диссертации состоится «15» октября 2025 г. В 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3521>

Автореферат разослан «__» сентября 2025 г.

Ученый секретарь
 диссертационного совета МГУ 016.6,
 кандидат технических наук

К. М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В отличие от взрывных источников, вибрационные источники характеризуются высокой безопасностью, эффективностью выполнения работ и низким энергопотреблением, что способствует широкому распространению технологий сейсморазведки с вибрационными источниками по всему миру. С 1975 года по настоящее время около 80% объема наземных сейсморазведочных работ в мире выполняется с использованием вибрационных источников.

Использование вибрационных источников стабильно растёт с каждым годом, однако для их широкомасштабного применения остаются нерешёнными ключевые вопросы, связанные с совершенствованием свип-сигналов, повышением эффективности полевых работ и оптимизацией обработки сейсмических данных. Эти ограничения препятствуют дальнейшему развитию технологий вибрационной сейсморазведки и требуют приоритетного внимания со стороны исследователей.

Поэтому определение оптимальных вибрационных методик для изучения конкретных площадей является чрезвычайно актуальной задачей, равно, как и поиск свип-сигналов, позволяющих повысить эффективность вибрационного метода.

Степень разработанности темы исследования

Эволюция вибрационной сейсморазведки прошла три основные стадии. В 1950-60-е годы велись эксперименты по разработке и полевым испытаниям вибрационных источников. В 1970-80-е годы, на стадии массового производства, использовались поочередные возбуждения, что позволяло достигать 300–500 возбуждений в день. С начала 1990-х годов методы Flip-Flop sweep, Slip-Sweep, ISS и HFVS значительно увеличили производительность, превысив 5000 возбуждений в день.

Изначально использовались линейные (ЛЧМ) свип-сигналы, применявшиеся с 1950-х годов. Впоследствии были разработаны нелинейные свип-сигналы — степенные и логарифмические, что помогло компенсировать потери энергии и улучшить качество данных (Taozhifei, 2001). Концепция псевдослучайных свип-сигналов была предложена Crook и Rieble в 1966 году. В 1970-х Cunningham (1979) показал, что псевдослучайные коды значительно снижают уровень боковых лепестков. В 1976 году Goupillaud предложил метод создания псевдослучайных свип-сигналов на основе модификации линейных (ЛЧМ) свип-сигналов. В 1990-х годах Burger и Baliguet (1992) разработали методы управления вибраторами, позволяя эффективно

использовать эти сигналы в населённых пунктах. В 2000-х годах Iranpour et al. (2015) оптимизировали амплитудно-частотные характеристики и корреляционные свойства псевдослучайных свип-сигналов с помощью различных алгоритмов. Dean (2012) продемонстрировал, что правильная настройка параметров этих сигналов обеспечивает высокое качество данных. Последующие исследования (Nasreddin et al., 2012; Scholtz, 2013; Dean, 2014; Askeland et al., 2009; Sallas et al., 2011; Wong и Langton, 2014; Thomas et al., 2012; Zhukov et al., 2017; Korotkov et al., 2023) подтвердили высокую помехоустойчивость псевдослучайных сигналов благодаря узкому главному лепестку и уменьшенным боковым лепесткам автокорреляционной функции. Эти сигналы показали значительный потенциал для применения в технологии ISS, минимизируя взаимные помехи одновременно работающих источников и улучшая качество данных.

Цель исследования

Цель данного исследования – повышение эффективности вибрационной сейсморазведки путем оптимизации управляющих свип-сигналов. Особое внимание уделяется теории псевдослучайных свип-сигналов, моделированию новых свип-сигналов, их практической реализации и применению в полевых условиях для повышения эффективности сейсморазведочных работ.

Основные задачи

1. Обработать и провести анализ сейсмических данных, полученных с использованием различных типов свип-сигналов, выбрать оптимальный сигнал для конкретного проекта.
2. Разработать новые свип-сигналы на основе псевдослучайных последовательностей, провести их одномерное и двумерное численное моделирование, а также провести сравнительный анализ полученных результатов с данными, полученными при использовании других типов свип-сигналов.
3. Реализовать возбуждение новых псевдослучайных свип-сигналов на небольшом электромеханическом вибрационном источнике. Провести эксперименты, оценить влияние новых псевдослучайных свип-сигналов на качество полно-волновых сейсмических изображений при неизменных параметрах съемки. Сравнить полученные данные с результатами, полученными при использовании других типов свип-сигналов.

Предмет исследования

Предметом исследования является сравнение и анализ различных вибрационных свип-сигналов на Астраханском газоконденсатном

месторождении (АГКМ) и разработка новых псевдослучайных свип-сигналов.

Научная новизна

1. Предложены и разработаны новые типы псевдослучайных свип-сигналов, моделирование которых показало их высокую эффективность, что открывает новые возможности для повышения качества сейсмических данных.

2. Впервые реализовано возбуждение новых псевдослучайных свип-сигналов на электромеханическом вибрационном источнике, что позволило значительно улучшить качество сейсмических данных, включая повышение отношения сигнал/шум и улучшение разрешения, по сравнению с линейными и случайными Shuffle свип-сигналами.

3. По сравнению с другими свип-сигналами, технология новых псевдослучайных свип-сигналов позволяет повысить эффективность изучения верхней части разреза на основе возбуждения продольных и поперечных волн.

Теоретическая значимость исследований

Новые псевдослучайные свип-сигналы, разработанные в ходе исследования, повышают возможности вибрационной сейсморазведки, особенно при решении задачи повышения производительности работ.

Методология и методы исследования

При подготовке данной работы использовались полевые данные, полученные на Астраханском газоконденсатном месторождении при применении различных свип-сигналов. Проведен анализ всех типов свип-сигналов, применяемых в полевых работах, а также выполнена комплексная обработка и интерпретация сейсмических данных в соответствии с единым графиком обработки. Выполнены рекомендации по применению наиболее оптимального свип-сигнала в исследуемом районе. Кроме того, разработаны новые типы псевдослучайных свип-сигналов на основе теории псевдослучайных последовательностей, проведено их численное моделирование и реализовано возбуждение на вибрационных источниках в полевых условиях. Основными методами исследования явились численное моделирование и сейсмоакустические исследования.

Генерация свип-сигналов выполнялась в программных комплексах VP и Pulse_to_Sweep. Разработка новых свип-сигналов осуществлялась с использованием программных кодов, написанных на Matlab. Геологические модели были построены в программном продукте TesseralPro. Численное моделирование проводилось в программных комплексах ProMax и Matlab. Обработка и анализ сейсмических данных выполнялись в ProMax.

Защищаемые научные положения

1. Применение нелинейных свип-сигналов способствует улучшению визуализации соляных куполов и повышению достоверности интерпретации на Астраханском месторождении по сравнению с результатами, полученными при использовании взрывных источников.

2. Разработанные новые типы псевдослучайных свип-сигналов на основе псевдослучайных последовательностей, обладают лучшими характеристиками по сравнению с ЛЧМ и Shuffle свип-сигналами.

3. Решена техническая задача реализации возбуждения новых псевдослучайных свип-сигналов на электромеханическом вибраторе. Сейсмические данные, полученные с использованием новых свип-сигналов, характеризуются более низким уровнем корреляционного шума, более широким частотным спектром.

4. Технология новых псевдослучайных свип-сигналов повышает достоверность и глубину исследования верхней части разреза на основе методики многоволновой сейсморазведки.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается обработкой полевых сейсмических данных, зарегистрированных в рамках производственных проектов, а также данными, полученными автором в ходе полевых исследований.

Надёжность разработанных свип-сигналов обоснована тестовыми расчётами на модельных данных и подтверждена полевыми испытаниями с использованием электромеханического вибратора.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в научно-исследовательском проекте, в рамках которого исследовал характеристики различных свип-сигналов и проводил обработку данных при их применении. В процессе работы была изучена теория м-последовательностей и псевдослучайных свип-сигналов, а также разработаны новые псевдослучайные свип-сигналы на основе теории м-последовательностей. Эти сигналы впервые были реализованы в электромеханическом вибраторе, что позволило доказать повышение качества и эффективности сейсмических данных при их использовании. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причём вклад соискателя был определяющим. Практически вся работа над диссертацией была выполнена автором самостоятельно, включая формулировку основных выводов и положений, выносимых на защиту.

Апробация работы

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены на международных конференциях и научно-практических семинаров: «Ломоносов – 2021» (Москва, 2021), «ГеоЕвразия – 2022»¹ (Москва, 2022), 85th EAGE Annual Conference & Exhibition² (Осло, Норвегия, 2024).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для защиты в МГУ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованных источников из 105 наименований. Общий объем диссертации – 107 страниц, в том числе 46 рисунков и 5 таблиц.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, д.т.н., профессору Жукову Александру Петровичу за его бесценную поддержку, терпение и ценные рекомендации, оказанные на протяжении всего периода работы над диссертацией.

Отдельную благодарность хочу выразить заведующему кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета, д.ф.-м.н., профессору Владову Михаилу Львовичу, а также всем преподавателям и сотрудникам кафедры за переданные знания, поддержку и полезные советы.

Особую признательность автор выражает ведущему инженеру, к.т.н., Короткову Илье Петровичу за постоянную поддержку, наставничество и неоценимую помощь в подготовке научных статей и данной диссертации.

Кроме того, автор благодарит своих коллег из компании «Спецгеофизика» за их содействие и неоценимую помощь в обработке данных, также выражает глубокую признательность Российскому университету дружбы народов за предоставленное оборудование,

¹ Ван Жуйчжэ, Жуков А.П. Возможность оптимизации снижения уровня корреляционных шумов за счет использования зингеровых кодов // Труды V Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес», 2022, Том III (III), С. 64-66.

² R. Wang, I. Korotkov, A. Zhukov. Full-wave vibroseis acquisition with various controllable sweep signals emitted by lightweight electric vibrator // 85th EAGE Annual Conference & Exhibition, 2024, p. 1-5.

возможность проведения испытаний, а также всестороннюю поддержку, оказанную в ходе выполнения диссертационного исследования.

Наконец, особую благодарность хочу выразить своим родителям и близким за их безусловную поддержку, понимание и терпение на протяжении всего периода обучения. Без их веры в меня этот путь был бы гораздо сложнее.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены содержание работы, обоснование актуальности темы, формулировка задач, научная новизна, практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Современное состояние технологий вибрационной сейсморазведки

В главе 1 рассмотрено развитие вибрационной сейсморазведки, которая прошла три ключевых этапа.

Первый этап (1950-е – конец 1960-х) — экспериментальный. Основное внимание уделялось разработке систем вибрационных источников и проведению полевых испытаний для их совершенствования. Разрабатывались принципы генерации и регистрации вибрационных сигналов, а также методы обработки данных.

Второй этап (1970-е – 1980-е) — массовое внедрение. Вибрационные источники начали производиться серийно, что позволило использовать многократные вибрационные установки. Основным методом получения сейсмических записей стала взаимная корреляция, но из-за последовательного возбуждения производительность оставалась низкой — 300–500 возбуждений в день.

Третий этап (с начала 1990-х — настоящее время) — высокопроизводительные методы. Были внедрены технологии Flip-Flip Sweep, Slip-Sweep, ISS и HFVS, что значительно повысило производительность, превысив 5000 возбуждений в день (Stewart et al., 1959).

Свип-сигналы вибрационных источников эволюционировали, начиная от линейного (ЛЧМ) свип-сигнала до множества других типов. Эти сигналы классифицируются на три категории: линейные, нелинейные и псевдослучайные.

Псевдослучайные свип-сигналы обладают характеристиками белого шума и высокой ортогональностью с минимальными боковыми лепестками автокорреляционной функции. Мгновенная частота этих сигналов меняется случайным образом, что делает их эффективными для сейсморазведки в сложных условиях. Ключевыми типами являются

свёртка двоичной последовательности, фильтрация двоичной последовательности, импульсная развертка, перестановка свип-сигнала и генерация недвоичных случайных чисел. Псевдослучайные свип-сигналы разрабатывались для минимизации боковых лепестков автокорреляционной функции, улучшая разрешающую способность и снижая риск резонансных взаимодействий с сооружениями. В последние десятилетия такие сигналы стали важными для подавления шумов на этапе сбора данных (Rieble et al., 1966; Crook et al., 1966; Dean, 2014; Bagaini, 2010; Li Hongyan, 2015).

Глава 2. Сравнение различных вибрационных свип-сигналов при выполнении опытно-методических работ на АГКМ

В данной главе рассмотрен процесс выбора оптимального свип-сигнала для исследования соляно-купольной структуры на левобережье Астраханского газоконденсатного месторождения. Описаны типы свип-сигналов, их параметры и методы обработки сейсмических данных.

С целью уточнения геологического строения подсолевых отложений и прогноза положения залежей ОАО «Оренбургская геофизическая экспедиция» провело 2D МОГТ на левобережном участке Астраханского свода, обозначенном красной стрелкой на рис. 1.

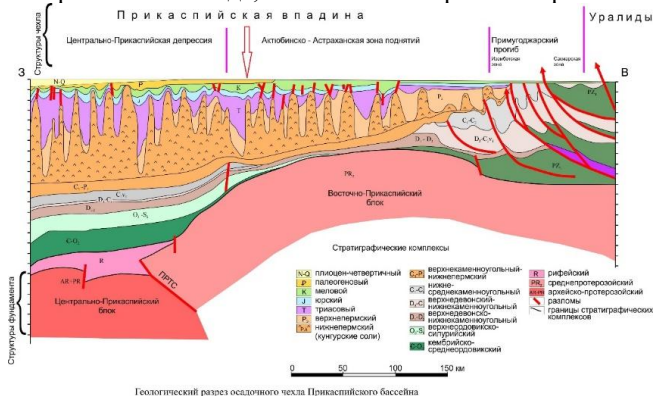


Рис. 1. Кастийский Бассейн, где красная стрелка указывает, где проводились разведочные работы.

Для достижения указанной цели была проведена серия тестов с различными типами вибрационных свип-сигналов на профильной линии 2D, которая ранее исследовалась с использованием взрывного источника. В ходе экспериментов были протестированы следующие типы вибрационных свип-сигналов: Линейный свип-сигнал, Адаптивный свип-сигнал (AViSeis), Низкочастотный свип-сигнал (Low-dwell), Широкополосный свип-сигнал (Broadswep).

Для обработки сейсмических данных был использован единый граф обработки. Для оценки качества данных был проведен детальный сравнительный анализ (Yilmaz, 2001).

Амплитудные спектры

Спектр импульсного сигнала от взрывного источника узкополосный, с подавлением низких и высоких частот. Линейный свип охватывает более широкий диапазон, но недостаточно эффективен ниже 15 Гц. Адаптивный свип частично компенсирует высокочастотное затухание, обусловленное земной толщей, однако он не имеет низкочастотной составляющей. Низкочастотный свип-сигнал расширяет спектр в область низких частот, что важно при изучении глубинных горизонтов. Максимальный частотный диапазон обеспечивает широкополосный свип-сигнал, передающий как низкие, так и высокие частоты. Эти характеристики обеспечивают его преимущество по сравнению с другими сигналами (Рис. 2).

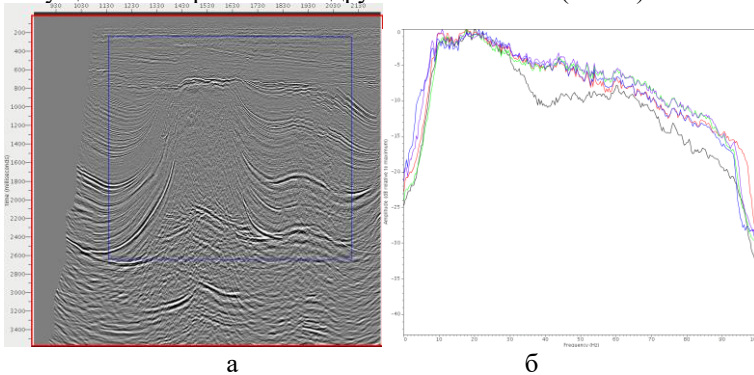


Рис. 2. (а) Окно для расчета спектра, (б) спектры различных временных разрезов (чёрный – взрывного источника, красный – Линейного свип-сигнала, зелёный – Адаптивного свип-сигнала, синий – Низкочастотного свип-сигнала, фиолетовый – Широкополосного свип-сигнала).

Временные разрезы после временной миграции до суммирования

Визуальный анализ сейсмических разрезов (Рис. 3) подтвердил преимущества низкочастотных и широкополосных свип-сигналов. Применение низкочастотного свип-сигнала обеспечивает более уверенное отображение глубинных структур за счёт усиленной низкочастотной составляющей, что особенно актуально при исследовании сложнопостроенных зон, включая соляные купола и глубокие горизонты. Широкополосный свип-сигнал, в свою очередь,

сочетает достаточную глубину проникновения с высокой динамической контрастностью отражающих границ.

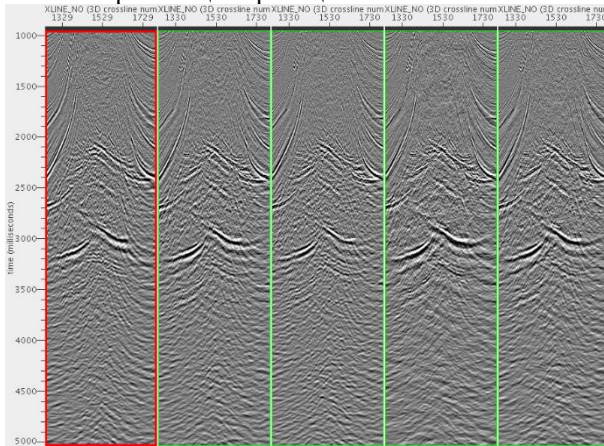


Рис. 3. Временные разрезы вдоль тестового профиля после временной миграции (1000–5000 мс). Слева направо представлены разрезы, полученные с использованием взрывного источника, Линейного свип-сигнала, Адаптивного свип-сигнала, Низкочастотного свип-сигнала и Широкополосного свип-сигнала.

Фильтрация по октавам

Рис. 4 иллюстрирует результаты октавной полосовой фильтрации для всех типов обработанных данных. Наиболее широкую амплитудную полосу демонстрируют данные, полученные с использованием широкополосного свип-сигнала, особенно в низкочастотном диапазоне 3–6 Гц. В этой области наблюдается заметное улучшение визуального разрешения временных разрезов по сравнению с другими типами сигналов.

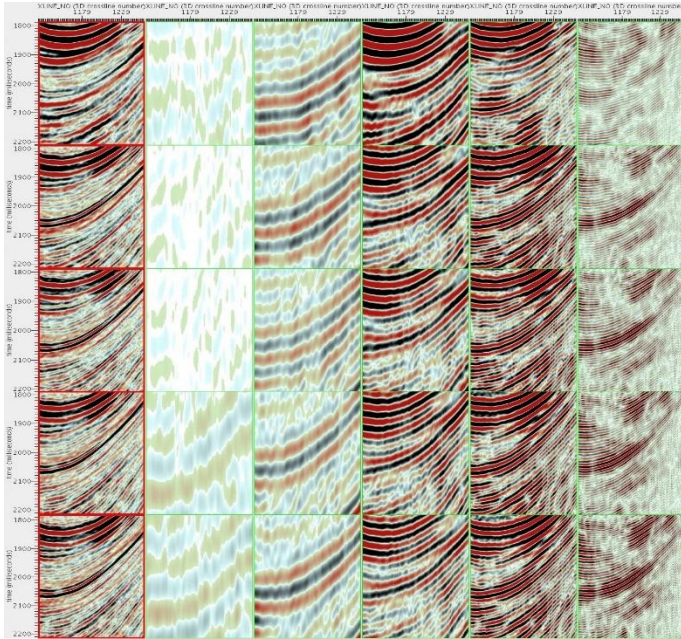


Рис. 4. Временные разрезы (1800–2200 мс, номер CDP 1129–1259) после фильтрации по октавам (узкополосная фильтрация). Слева направо — нефигурный временной разрез, 3–6 Гц узкополосная фильтрация, 6–12 Гц узкополосная фильтрация, 12–24 Гц узкополосная фильтрация, 24–48 Гц узкополосная фильтрация, 48–96 Гц узкополосная фильтрация. Сверху вниз — взрывные данные, данные Линейного свип-сигнала, данные Адаптивного свип-сигнала, данные Низкочастотного свип-сигнала, данные Широкополосного свип-сигнала.

Отношение сигнал/шум

Анализ отношения сигнал/шум (Рис. 5) показал, что данные от взрывного источника характеризуются наименьшими значениями этого показателя. Максимальное отношение сигнал/шум зафиксировано при использовании линейного свип-сигнала. Широкополосный свип демонстрирует близкие результаты с незначительным снижением, но при этом расширяет эффективный частотный диапазон. Низкочастотный свип-сигнал уступает по этому параметру широкополосному, однако превосходит адаптивные сигналы.

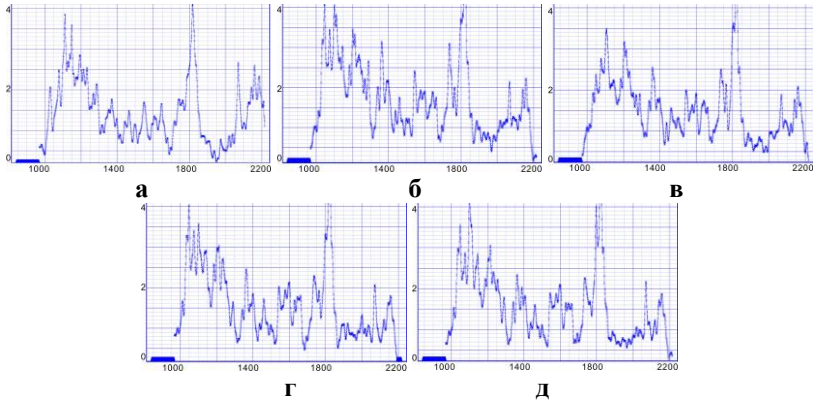


Рис. 5. Отношение сигнал/шум сейсмических данных в интервале 2400–2600 мс. По оси X — номер CDP, по оси Y — отношения сигнал/шум. (а) Взрывного источника, (б) Линейного свип-сигнала, (в) Адаптивного свип-сигнала, (г) Низкочастотного свип-сигнала, (д) Широкополосного свип-сигнала.

Разрешающая способность

Для оценки вертикального разрешения использовались данные в интервале 2400–2600 мс. Расчёты показали: взрывной источник — 25 м, линейный свип-сигнал — 20 м, адаптивный — 19,5 м, низкочастотный — 19 м, широкополосный — 18 м. Таким образом, вибрационные свип-сигналы обеспечивают более высокое вертикальное разрешение по сравнению с импульсным источником, а наилучший результат достигается при использовании широкополосного свип-сигнала.

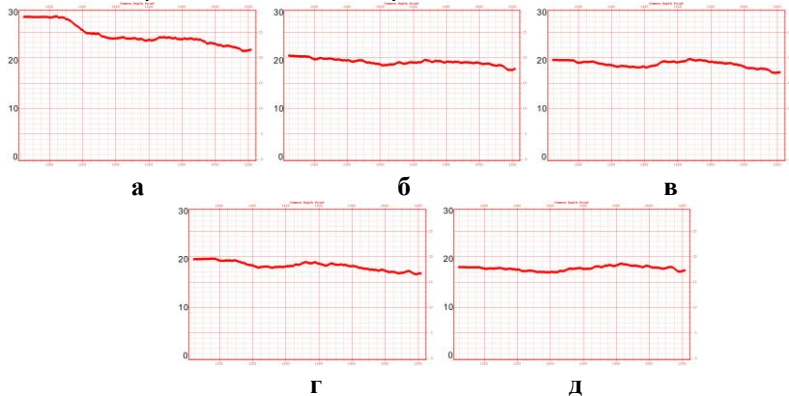


Рис. 6. Разрешающая способность сейсмических данных в интервале 2400–2600 мс. По оси X — номер CDP, по оси Y — разрешающая способность. (а) Взрывного источника, (б) Линейного свип-сигнала, (в) Адаптивного свип-сигнала, (г) Низкочастотного свип-сигнала, (д) Широкополосного свип-сигнала.

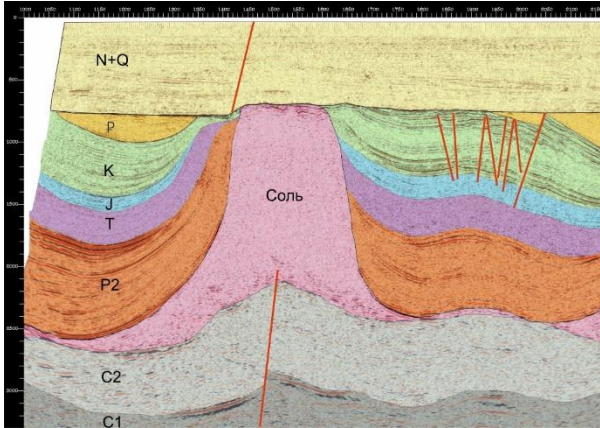


Рис. 7. Результат интерпретации на основе широкополосных данных.

Проведённые исследования показали, что по качеству регистрируемых данных вибрационные не уступает взрывному. Наиболее эффективным среди протестированных свип-сигналов является широкополосный, обеспечивающий расширение спектра возбуждаемых колебаний в низко- и высокочастотной области. Использование широкополосного свип-сигнала позволяет увеличить глубину зондирования, повысить вертикальное разрешение, улучшить отображение отражающих горизонтов, отношение сигнал/шум и выявляемость структурных нарушений.

Глава 3. Исследование и моделирование новых методов генерации псевдослучайных свип-сигналов

В данной главе представлены разработка и моделирование новых псевдослучайных свип-сигналов, основанных на использовании псевдослучайных последовательностей. Эти свип-сигналы формируются путем изменения полярности сегментов полного периода или полупериода линейных либо синусоидальных сигналов в соответствии с минус-кодом М-последовательностей. Было исследовано три различных варианта псевдослучайных свип-сигналов с различными схемами кодирования.

Генерация псевдослучайных свип-сигналов на основе технологии фазовой манипуляции

В данной части представлен усовершенствованный метод генерации псевдослучайных свип-сигналов, основанный на подходе, предложенном Wischmeyer (Wischmeyer, 1966). Разработаны три новых типа псевдослучайных свип-сигналов.

1. Первый тип: сформирован на основе моночастотного синусоидального свип-сигнала путем изменения полярности полупериодов в соответствии с минус-кодом М-последовательности.

2. Второй тип: получен из линейного свип-сигнала путем изменения полярности сегментов полного периода в соответствии с минус-кодом М-последовательности.

3. Третий тип: сгенерирован аналогично второму, но с изменением полярности сегментов полупериода.

Конструирование псевдослучайных свип-сигналов на основе М-последовательностей

М-последовательность, формируемая регистром сдвига с линейной обратной связью, представляет собой бинарную последовательность, элементы которой принимают значения 0 и 1. Для дальнейшего использования значения 0 преобразуются в -1, что позволяет получить последовательность из значений +1 и -1 (Рис. 8 (а)). Эта последовательность используется для манипуляции полярностью сегментов синусоидальных или линейных свип-сигналов.

Процесс генерации псевдослучайных свип-сигналов включает следующие этапы. Сначала декомпозиция сигнала: синусоидальный или линейный свип-сигнал разделяется на множество сегментов. Для синусоидального сигнала каждый сегмент охватывает половину периода (Рис. 8 (b)). Для линейного свип-сигнала сегменты могут охватывать полный период (Рис. 8 (c)) или половину периода (Рис. 8 (d)). Затем сопоставление с М-последовательностью: каждому сегменту сигнала соответствует один элемент М-последовательности. Манипуляция полярностью: полярность каждого сегмента изменяется в соответствии с кодом М-последовательности. В результате данного процесса формируются три новых типа псевдослучайных свип-сигналов.

1. Sinehalf (Рис. 3.11 (e)) – основан на синусоидальных сегментах, манипулируемых на уровне половины периода.

2. Linfull (Рис. 3.11 (f)) – использует линейные сегменты полного периода.

3. Linhalf (Рис. 3.11 (g)) – построен на линейных сегментах половина периода.

Свип-сигналы Linfull и Linhalf сохраняют частотные характеристики исходного линейного свип-сигнала.

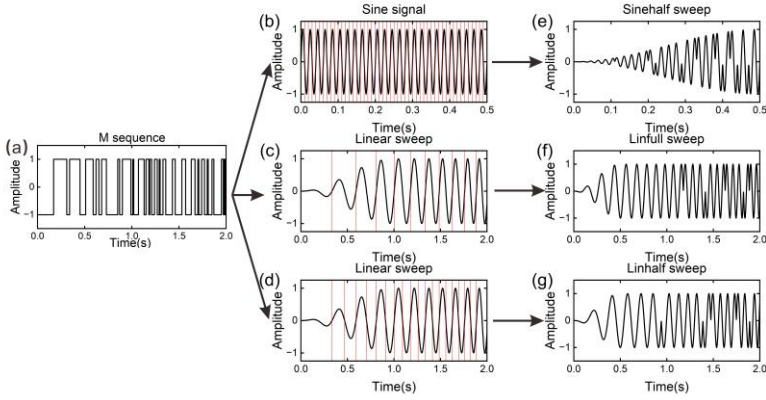


Рис. 8. Схема формирования псевдослучайных свип-сигналов, (а) М-последовательность, (б) синусоидальный сигнал с частотой 50 Гц, (с) линейный свип-сигнал (полный период), (д) линейный свип-сигнал (половина периода), (е) псевдослучайный свип-сигнал Sinehalf, (ф) псевдослучайный свип-сигнал Linfull, (г) псевдослучайный свип-сигнал Linhalf.

Математическое описание новых псевдослучайных свип-сигналов

(1) Свип-сигнал Sinehalf

$$y(t) = \sin(2\pi f_0 t + \pi m_{n(t)}) \quad (1)$$

Где: t — время в секундах, $[0, T]$, где T — общее время сигнала, f_0 — частота исходного сигнала в Гц, m_n — n -й элемент М-последовательности, принимающий значения из множества $\{0, 1\}$.

(2) Свип-сигнал Linfull

$$y(t) = \sum_{k=1}^{k=N} y_k(t_{2k}) = \sum_{k=1}^{k=N} \sin\left(2\pi\left(f_0 t_{2k} + \frac{f_1 - f_0}{2T} t_{2k}^2\right) + \pi m_k\right) \quad (2)$$

Где: t_{2k} — временной вектор k -го полного периода, секунд, f_0 и f_1 — начальная и конечная частоты сигнала, Гц, m_k — k -й элемент М-последовательности, значения из множества $\{0, 1\}$.

(3) Свип-сигнал Linhalf

$$y(t) = \sum_{k=1}^{k=N} y_k(t_k) = \sum_{k=1}^{k=N} \sin\left(2\pi\left(f_0 t_k + \frac{f_1 - f_0}{2T} t_k^2\right) + \pi m_k\right) \quad (3)$$

Где: t_k — временной вектор для k -го полупериода, секунд, f_0 и f_1 — начальная и конечная частоты сигнала, Гц, m_k — элемент М-последовательности, который принимает значения из множества $\{0, 1\}$.

Численное моделирование псевдослучайных свип-сигналов

Результаты моделирования для четырёх различных свип-сигналов (Shuffle, Linfull, Linhalf и Sinehalf) были сопоставлены с результатами, полученными при использовании ЛЧМ свип-сигналов.

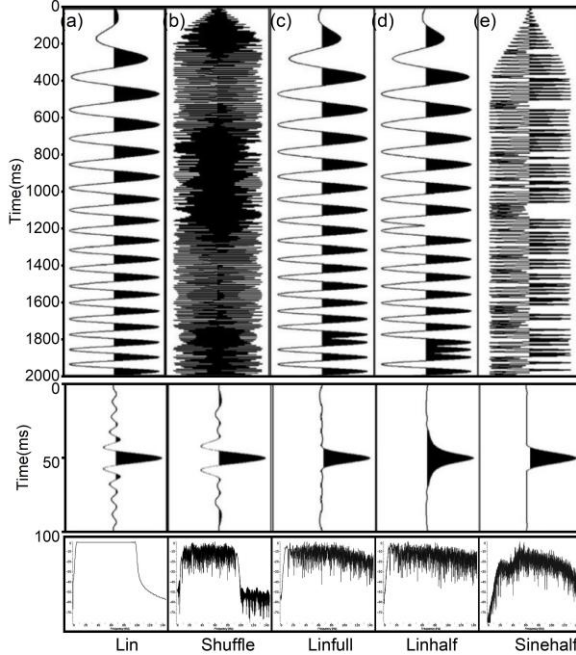


Рис. 9. Свип-сигналы (в верхней части), их автокорреляционные функции (в центральной части) и спектры (в нижней части).

Одномерное моделирование

Была построена шестислойная геологическая модель с коэффициентами отражения 1024, 700, -1000, -512 и 256, расположенными на соответствующих границах сверху вниз. Свип-сигналы были свёрнуты с этими коэффициентами отражения для формирования виброграмм. Затем полученные виброграммы были коррелированы с каждым из свип-сигналов, что позволило получить сейсмические записи (Рис. 10).

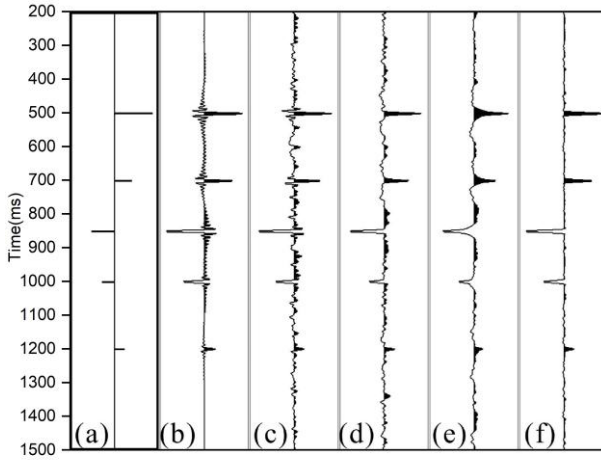


Рис. 10. Сейсмические записи одномерного моделирования (качество трасс улучшается слева направо), (a) модель коэффициента отражения, (b) Lin свип-сигнал, (c) Shuffle свип-сигнал, (d) Linfull свип-сигнал, (e) Linhalf свип-сигнал, (f) Sinehalf свип-сигнал.

На рис. 10 представлены пять сейсмических записей, полученных при использовании различных свип-сигналов. Запись с линейным свип-сигналом (Lin) характеризуется повышенным уровнем корреляционного шума вблизи главного экстремума и его быстрым затуханием. Shuffle свип-сигнал демонстрирует максимальный уровень шума и выраженные боковые лепестки. Наименьший уровень шума и наиболее чёткий экстремум наблюдаются при использовании Sinehalf свип-сигнала. Записи, полученные с применением сигналов Linfull и Linhalf, отличаются меньшим шумом по сравнению с Shuffle, однако имеют более широкие главные лепестки и медленно затухающие боковые.

Двумерное моделирование

На рис. 11 представлена двумерная модель, построенная на основе реальных сейсмических данных, извлеченных из трехмерного сейсмического куба, полученного на месторождении в Западной Сибири. Модель отличается высокой степенью детализации. В верхней части модели выделяется газовая ловушка, под которой залегает значительное количество тонких слоистых структур. Глубина модели составляет 3000 метров, ширина — 47 000 метров, а скорости распространения сейсмических волн варьируются в диапазоне от 1400 м/с до 4200 м/с.

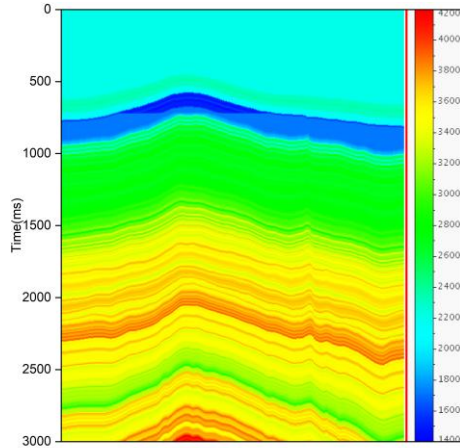


Рис. 11. Двумерная геологическая модель

Данная двумерная модель была использована для выполнения численного моделирования с применением пяти вышеописанных свип-сигналов. На основе результатов моделирования были получены временные разрезы, представленные на рис. 12, включая временные разрезы до и после обработки.

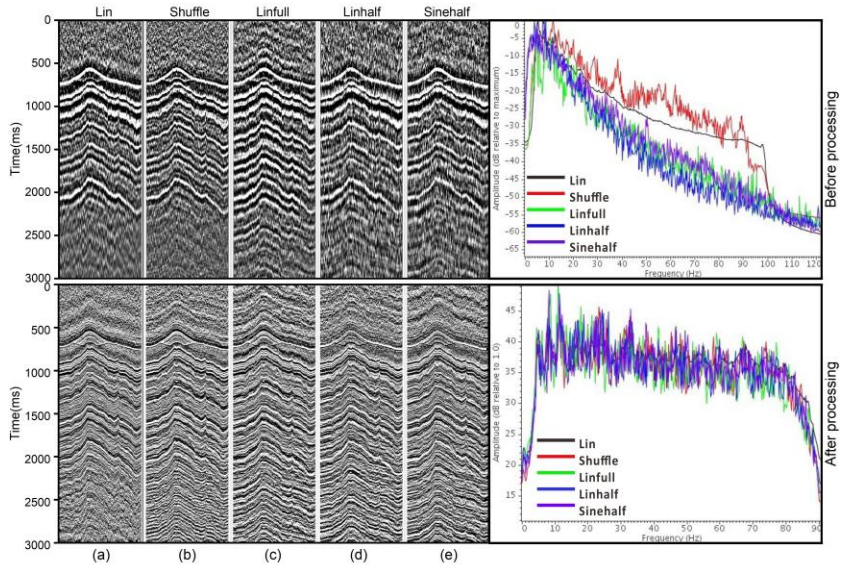


Рис. 12. Временные разрезы и их спектры, до обработки (вверху) и после обработки (внизу). (a) Lin свип-сигнал, (b) Shuffle свип-сигнал, (c) Linfull свип-сигнал, (d) Linhalf свип-сигнал, (e) Sinehalf свип-сигнал.

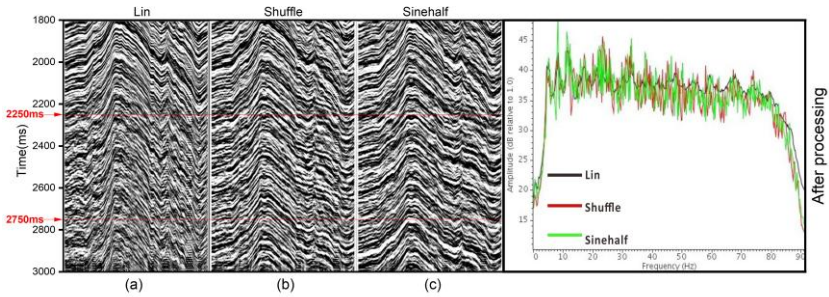


Рис. 13. Временные разрезы (1800–3000 мс) и их спектры (после обработки), (a) Lin свип-сигнал, (b) Shuffle свип-сигнал, (c) Sinehalf свип-сигнал.

Для двумерного численного моделирования использовались одинаковые параметры свип-сигналов и единая схема обработки. На рис. 12 представлены временные разрезы до и после обработки, а на рис. 13 — разрезы после обработки для свип-сигналов Lin, Shuffle и Sinehalf. Спектральный состав данных схож, но различается соотношение сигнал/шум.

Разрез с сигналом Sinehalf показывает наилучшую чёткость, высокое разрешение и минимальный шум. Видны тонкие слои над ловушкой. Для Lin характерен повышенный корреляционный шум, особенно в нижней части. Свип-сигнал Shuffle даёт среднее качество — шум мешает различать верхние слои. Свип-сигналы Linfull и Linhalf демонстрируют низкий уровень шума и лучшее горизонтальное разрешение по сравнению с Lin и Shuffle.

Моделирование показало: Lin — наименее эффективен, Shuffle даёт хорошее разрешение, но требует вдвое больше времени. Sinehalf обеспечивает наилучшее изображение. По сравнению с Shuffle, новые псевдослучайные сигналы позволяют сократить время вдвое, улучшить сигнал/шум и повысить разрешение глубоких горизонтов.

Глава 4. Полевые тесты новых псевдослучайных свип-сигналов

Мы провели эксперименты для оценки влияния различных управляемых свип-сигналов на качество полно-волновых сейсмических изображений, сравнив их с линейным свип-сигналом. Использовался легкий электромеханический вибратор, генерирующий P- и S-волны. Эксперименты проводились на 220 м вдоль кампуса университета. Были

протестированы семь типов свип-сигналов, включая случайный и пять псевдослучайных, которые могут повысить производительность в 3D-съемках. Также был испытан эквивалентный свип-сигнал на основе детерминированного вейвлета Рикера для улучшения корреляции отражений.

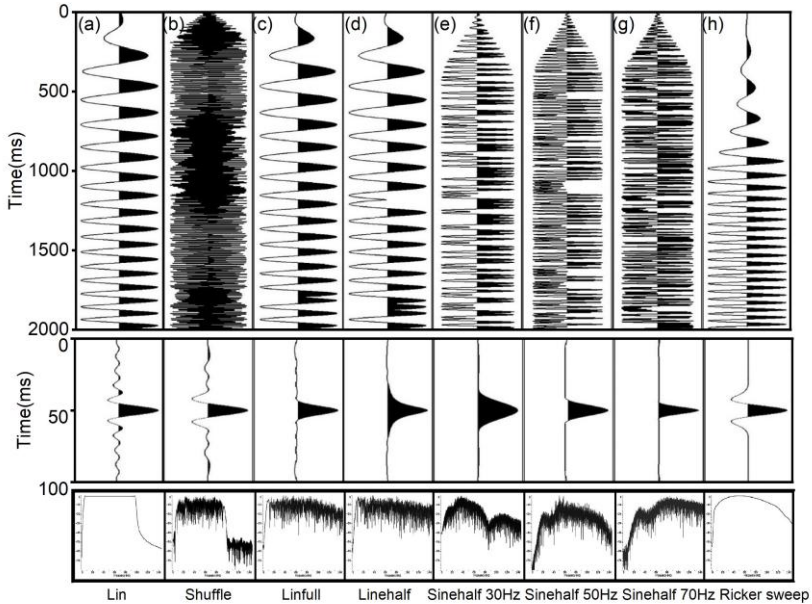


Рис. 14. Свип-сигналы для теста(вверху), их автокорреляционные функции (в середине) и спектры (внизу).

Цель нашего исследования заключалась в изучении влияния различных управляемых свип-сигналов на качество сейсмических изображений полного волнового поля. Для этого мы провели тестирование новых псевдослучайных свип-сигналов и сравнили их с традиционными линейными свип-сигналами при одинаковых параметрах регистрации. Эксперименты проводились на территории кампуса университета в Москве.

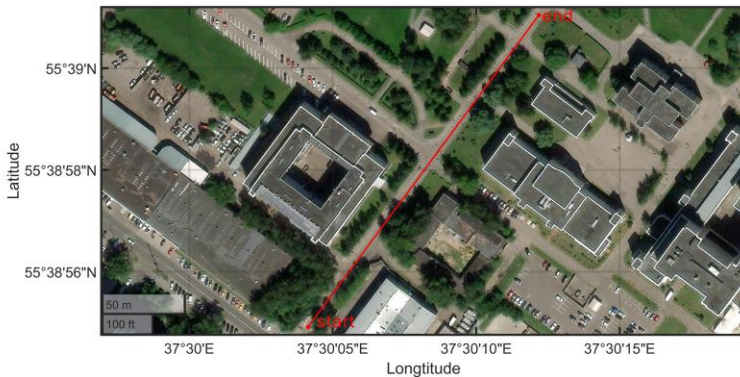


Рис. 15. Местоположение опытной линии и исследуемого района. Красная линия обозначает типичную 2D-сейсмическую линию, ориентированную с юго-запада на северо-восток.

Сбор сейсмических данных

На рис. 16 показаны компоненты оборудования, использованного в полевых испытаниях. Эксперимент проводился в городской среде на территории университета вдоль 222,5-метровой линии по асфальтированному тротуару (Рис. 15). Вибрационный источник — электромеханический вибратор Lightning, генерирующий Р- и S-волны (Рис. 16 (с) и (d)). Перемещение вибратора осуществлялось с помощью вездехода «Лесник» (Рис. 16 (a)). Сейсмические данные регистрировались с помощью беспроводных узлов SCOUT (Рис. 16 (b)), установленных вдоль профиля с шагом 2,5 м. Эти устройства фиксировали отражённые и обменные волны в режиме распределённой регистрации.

Эксперимент включал два прохода: первый — для возбуждения Р-волн с вертикально установленным вибратором, второй — для S-волн, при котором вибратор поворачивался на 90°. В каждом из 45 пунктов сейсмического возбуждения воспроизводились восемь типов свип-сигналов. Длительность сигнала составляла 20 секунд, за исключением Shuffle-сигнала (40 секунд). Запись данных продолжалась 5 секунд после каждого сигнала. Двухдневные испытания подтвердили возможность использования оборудования для полно-волновых исследований.



Рис. 16. Расположение опытной линии и используемого оборудования. (a) Трасса опытной линии и транспортное средство с вибрационным источником, (b) беспроводная система SCOUT и трёхкомпонентный сейсмоприёмник, (c) вибрационный источник в режиме возбуждения P-волн, (d) вибрационный источник в режиме возбуждения S-волн.

Обработка данных и результаты

Для анализа полного 6С волнового поля были выделены монотипные P-P и S-S отражения с одинаковой поляризацией: вертикальная компонента (Z-Z) — для P-волн, горизонтальная (Y-Y) — для S-волн. После корреляции данные обрабатывались по стандартной схеме: усиление, деконволюция, статическая коррекция, шумоподавление, NMO-выравнивание, суммирование по ОГТ и постсуммирование (Duan et al., 2023).

На рис. 17 приведены временные разрезы после обработки восьми типов свип-сигналов для P-P (верх) и S-S волн (низ). Несмотря на единый граф обработки, наблюдаются значительные различия.

Относительно линейного свип-сигнала (Рис. 17 (a)), другие сигналы дают более чёткое изображение структур и большую глубину проникновения. Псевдослучайные сигналы Sinehalf с частотами 30, 50 и 70 Гц (Рис. 17 (e), (f) и (g)) демонстрируют существенное улучшение разрешения, подтверждая, что частотное содержание влияет на качество данных.

Разрез, полученный с использованием Ricker свип-сигнала (Рис. 17 (h)) отличается высокой контрастностью и детализацией, превосходя линейный свип-сигнал. Это связано с его согласованностью, что соответствует теоретическим ожиданиям.

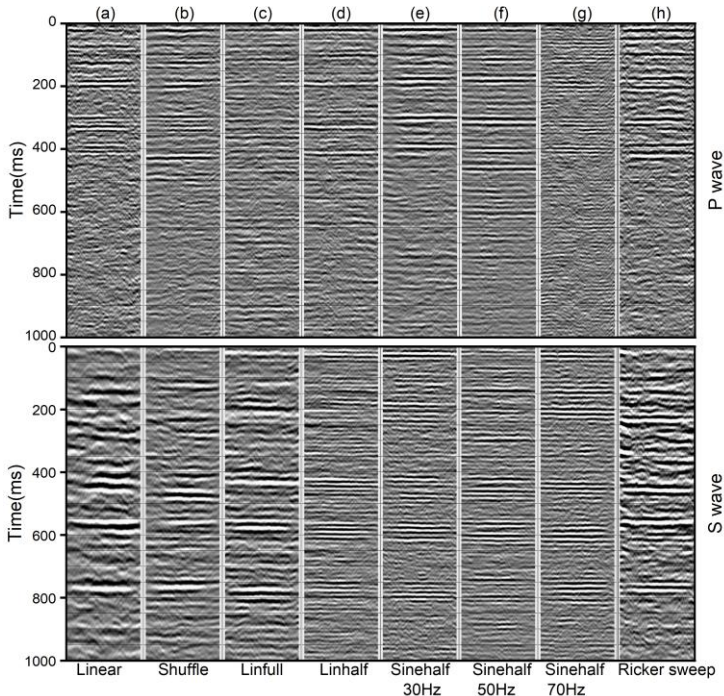


Рис. 17. Временные разрезы для Р-волн (верхний ряд) и S-волн (нижний ряд), полученные с использованием различных свип-сигналов. (а) Линейный свип-сигнал, (b) Shuffle свип-сигнал, (c) Linfull свип-сигнал, (d) Linhalf свип-сигнал, (e) Sinehalf 30 Гц, (f) Sinehalf 50 Гц, (g) Sinehalf 70 Гц, (h) Ricker свип-сигнал.

На завершающем этапе обработки данные были преобразованы в глубинные разрезы с использованием среднеквадратичных скоростей Р-волн. На рис. 18 представлено сравнение глубинных разрезов, полученных с использованием линейного ((a) и (b)) и псевдослучайного Sinehalf 50 Гц ((c) и (d)) свип-сигналов. Разрезы, построенные на основе линейного свип-сигнала, демонстрируют высокий уровень шума, что затрудняет, но не исключает возможность выделения геологических границ.

В отличие от них, глубинные разрезы, построенные с использованием псевдослучайного свип-сигнала Sinehalf 50 Гц, обладают высокой детализацией и четкостью, что подтверждается их соответствием геологическому разрезу, приведенному на рис. 18 (e). Особенно следует отметить верхнюю границу девонских отложений, четко отображенную на глубине около 400 м (Рис. 18 (d), черная стрелка). Эта граница, ранее недостаточно выраженная на

приповерхностных сейсмических разрезах региона, теперь представлена значительно более точно благодаря использованию псевдослучайного свип-сигнала.

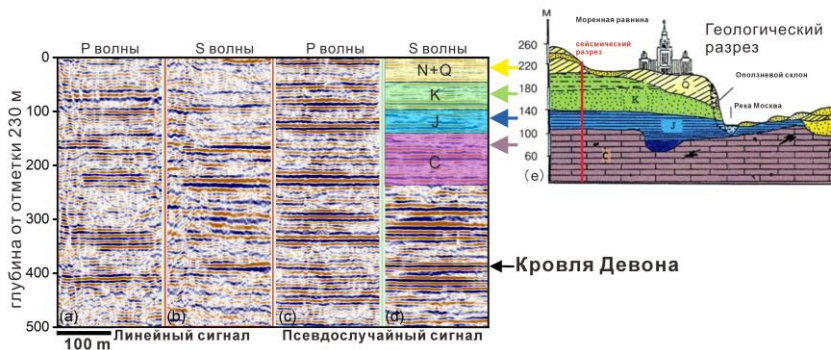


Рис. 18. Сравнение глубинных разрезов, полученных с использованием линейного и Sinehalf 50 Гц свип-сигналов. (a) Линейный свип-сигнал (Р-волны), (b) линейный свип-сигнал (S-волны), (c) Sinehalf 50 Гц свип-сигнал (Р-волны), (d) Sinehalf 50 Гц свип-сигнал (S-волны), (e) геологический разрез с указанием положения сейсмических разрезов (красная линия) и геологических интервалов, соответствующих сейсмическому разрезу, полученному с использованием псевдослучайных свип-сигналов (цветные стрелки).

Закключение

В данной работе изложены принципы вибрационной сейсморазведки, эволюция вибрационных источников, их структурные характеристики, а также классификация свип-сигналов. Определён оптимальный свип-сигнал для проекта в Астраханском регионе. Особое внимание уделено псевдослучайным свип-сигналам, моделированию и реализации новых псевдослучайных свип-сигналов на основе использования малогабаритного электромеханического вибратора и их применению для повышения качества и производительности сейсмических исследований.

Результаты исследований на основе данных Астраханского месторождения показывают, что среди вибрационных свип-сигналов наиболее оптимальным является широкополосный сигнал, который расширяет спектр возбуждаемых колебаний как в сторону низких, так и высоких частот.

Тщательно исследована история разработки псевдослучайных свип-сигналов и методы их формирования. Разработаны новые типы псевдослучайных свип-сигналов, основанные на М-последовательности, а также усовершенствованы методы их формирования. Для оценки эффективности этих свип-сигналов было выполнено одномерное и

двумерное моделирование, результаты которого показали, что новые псевдослучайные свип-сигналы обеспечивают более высокое разрешение и лучшую устойчивость к шумам по сравнению с линейными и Shuffle свип-сигналами.

Впервые было реализовано возбуждение предложенных новых псевдослучайных свип-сигналов с использованием небольшого электромеханического вибрационного источника, а также проведено тестирование различных типов свип-сигналов. По результатам обработки данных были построены сейсмические профили. Сейсмические данные, полученные с использованием этих новых свип-сигналов, характеризуются более низким уровнем корреляционного шума, более широким спектром и высоким качеством. По сравнению с другими свип-сигналами, технология новых псевдослучайных свип-сигналов позволяет увеличить глубину исследований многоволновой сейсморазведки. Экспериментальные данные подтвердили повышение качества и разрешения сейсмических изображений при использовании новых псевдослучайных свип-сигналов. Эти свип-сигналы демонстрируют значительный потенциал для эффективного применения в технологиях ISS.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

Будущее вибрационной сейсморазведки связано с разработкой высокомошных вибрационных источников, технологий с низкими и широкополосными частотными диапазонами, адаптивных технологий, а также высокопроизводительных сейсмических систем. С дальнейшим развитием вибрационных источников псевдослучайные свип-сигналы могут занять одно из ключевых мест среди существующих типов свип-сигналов. Перспективным направлением исследований является разработка нелинейных псевдослучайных последовательностей для генерации свип-сигналов и их применение в гидравлических вибрационных источниках. Данный подход может привести к созданию более эффективных сигналов, что, в свою очередь, расширит возможности современных методов сейсморазведки. В сочетании с новыми сейсмическими приборами эти технологии будут определять дальнейшее развитие вибрационной сейсморазведки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibrary Science index:

1. Ван Ж., Коротков И.П., Жуков А.П. Исследование и моделирование новых методов генерации псевдослучайных свип-сигналов // Геофизика, 2025, № 1, С. 28-34. EDN: BZOILZ (0.81 п.л., вклад автора 85%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ)).

2. Ван Ж., Коротков И.П., Жуков А.П. Многоволновой сейсмический эксперимент по тестированию управляемых псевдослучайных и детерминированного свип-сигналов // Геофизика, 2025, № 1, С. 74-79. EDN: DFTSQN (0.69 п.л., вклад автора 80%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ)).

3. Шехтман Г.А., Жуков А.П., Калимулин Р.М., Ван Жуйчжэ Многоволновое ВСП на оптоволоконном кабеле // Геофизика, 2025, № 3, С. 67-73. EDN: YPJNOK (0.81 п.л., вклад автора 30%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ)).

Научные статьи, опубликованные в других рецензируемых научных изданиях, включенных в дополнительный список изданий, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности и отрасли наук:

4. Ван Ж., Жуков А.П., Калимулин Р.М. Полевые сейсморазведочные работы 2D с целью определения оптимальной методики для солянокупольной тектоники на левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения // Приборы и системы разведочной геофизики, 2022, № 2 (73), С. 84-94. EDN: BTSGFD (1.27 п.л., вклад автора 65%, Импакт-фактор 0,056 (РИНЦ)).