

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Ван Жуйчжэ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ
УПРАВЛЯЮЩИХ СВИП-СИГНАЛОВ**

1.6.9. Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ	12
1.1. Обзор исследований технологии вибрационной сейсморазведки	12
1.2. Принцип работы вибрационного источника	21
1.3. Свип-сигналы	27
1.3.1. Линейный свип-сигнал	29
1.3.2. Нелинейные свип-сигналы	31
1.3.3. Псевдослучайные свип-сигналы	34
ГЛАВА 2. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ СВИП-СИГНАЛОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКИХ РАБОТ НА АГКМ.....	36
2.1. Общее сведение района исследований	36
2.2. Геолого-геофизическая изученность.....	40
2.3. Параметры 2D съёмки сейсмических работ.....	41
2.4. Свип-сигналы	43
2.5. Обработка и анализ данных.....	49
2.5.1. Амплитудные спектры.....	50
2.5.2. Временные разрезы после временной миграции до суммирования	52
2.5.3. Фильтрация по октавам	54
2.5.4. Отношение сигнал/шум.....	55
2.5.5. Разрешающая способность	56
2.6. Результат интерпретации	57
2.7. Выводы	58
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СВИП-СИГНАЛОВ.....	60
3.1. История разработки и применения псевдослучайных свип-сигналов в вибрационной сейсморазведке.....	60
3.2. Случайные и псевдослучайные последовательности	69

3.3. Генерация псевдослучайных свип-сигналов на основе технологии фазовой манипуляции	73
3.4. Математическое описание новых псевдослучайных свип-сигналов	76
3.5. Численное моделирование псевдослучайных свип-сигналов	80
3.6. Выводы	87
ГЛАВА 4. ПОЛЕВЫЕ ТЕСТЫ НОВЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СВИП-СИГНАЛОВ	88
4.1. Свип-сигналы для теста	88
4.2. Условия проведения полевых работ.....	90
4.3. Сбор сейсмических данных	92
4.4. Обработка данных и результаты	94
4.5. Выводы	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100

ВВЕДЕНИЕ

Сейсморазведка является одним из ключевых методов геофизической разведки, широко применяемым в поиске и разведке месторождений нефти и газа. Эффективность и качество сейсмических исследований во многом определяются типом используемого источника. Взрывные источники, несмотря на их широкое распространение, сопряжены с рисками при транспортировке и эксплуатации, а также могут вызывать повреждения дорожного покрытия, подземных коммуникаций и инженерных сооружений. Поэтому их применение ограничено вблизи городских и сельских населённых пунктов.

Исследования в области разработки вибрационных источников начались в 1950-х годах в США и СССР. Идея была заимствована из технологий эхолокации, применяемых в радиолокации и гидролокации, и впервые предложена в 1952 году Bill Doty и его научным руководителем John Crawford из компании Continental Oil (США) (Crawford et al., 1960). После восьмилетних исследований, направленных на решение теоретических и практических задач, к концу 1960 года вибрационные источники начали применяться в полевых условиях для разведки нефти и газа. В это же время советские учёные разработали вибрационные источники с эксцентриковым механизмом, а к концу 1970-х годов наладили серийное производство гидравлических вибрационных источников для нефтегазовой промышленности (Шнеерсон и др., 1990).

Вибрационные источники обладают рядом преимуществ перед традиционными взрывными источниками, включая безопасность, экологичность, высокую эффективность и низкое энергопотребление, что способствовало их широкому распространению и внедрению в сейсморазведку. В 1975 году 43% наземных сейсморазведочных работ в США выполнялось с использованием вибрационных источников. В 2007 году этот показатель для китайской компании BGP (Bureau of Geophysical Prospecting) составил 70%, а в первой половине 2009 года 80% всех наземных сейсморазведочных работ в мире проводилось с их применением.

Таким образом, можно отметить, что применение вибрационных источников продолжает ежегодно расти. Однако их широкомасштабное внедрение сопряжено с рядом ключевых проблем, требующих решения, включая оптимизацию свип-сигналов, повышение производительности работ и совершенствование методов обработки данных. Во-первых, традиционные линейные (ЛЧМ) свип-сигналы характеризуются значительными боковыми лепестками автокорреляционной функции, что приводит к повышенному уровню корреляционного шума на изображениях и снижению разрешающей способности сейсмических данных. Во-вторых, поглощение и затухание сейсмических волн в геологической среде носят нелинейный характер, что затрудняет компенсацию высокочастотных потерь при использовании стандартных линейных

сви́п-сигналов. В-третьих, высокопроизводительные методики вибрационной сейсморазведки требуют разработки сигналов, слабо коррелированных друг с другом для более оптимального подавления взаимных шумов, создаваемых одновременно работающими виброисточниками.

В настоящей работе проводится анализ свойств и характеристик различных сви́п-сигналов, а также обработка сейсмических данных, полученных при их применении, с целью выбора оптимального сви́п-сигнала для конкретного проекта на левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения. Кроме того, в рамках дальнейших исследований были разработаны новые типы псевдослучайных сви́п-сигналов на основе генерации псевдослучайных последовательностей, проведено их прямое численное моделирование, а также реализовано возбуждение данных сигналов с использованием электромеханического вибрационного источника. Кроме того, выполнено численное моделирование высокопроизводительных технологий с применением псевдослучайных сви́п-сигналов. Корректность и эффективность предложенного подхода подтверждены результатами численного моделирования и анализом обработанных реальных сейсмических данных.

Данная работа состоит из четырех глав. В первой главе рассматривается развитие сейсморазведки с использованием вибрационных источников, начиная с истории и текущего состояния данной технологии. Описываются конструктивные особенности вибрационных источников, а также стандартные методики проведения полевых работ. Кроме того, излагаются теоретические основы метода, включая принципы корреляции, являющиеся основным подходом к компрессии вибрационных записей. Особое внимание уделяется различным типам сви́п-сигналов и их характеристикам.

Во второй главе проведено сравнительное исследование сейсмических записей, полученных при использовании взрывного возбуждения и различных типов сви́п-сигналов вибрационных источников. На основе обработки и анализа реальных сейсмических данных был определён оптимальный сви́п-сигнал, наиболее подходящий для дальнейших 3D-исследований в заданных геологических условиях.

В третьей главе подробно рассматривается история развития псевдослучайных сви́п-сигналов, их основные типы и характеристики. Далее предлагаются новые типы псевдослучайных сви́п-сигналов, основанные на использовании псевдослучайных последовательностей. Проведено численное моделирование в различных условиях и для разных геологических сред. Результаты моделирования показывают, что по сравнению с традиционными линейными сви́п-сигналами полученные сейсмические данные характеризуются более высоким соотношением сигнал/шум и лучшим разрешением.

В четвёртой главе реализовано возбуждение предложенных новых псевдослучайных сви́п-сигналов на небольшом электромеханическом вибрационном источнике, а также проведено

тестирование различных типов свип-сигналов. По результатам обработки данных построены сейсмические профили. Выполнен сравнительный анализ данных, полученных с использованием новых свип-сигналов, традиционного линейного свип-сигнала и случайного свип-сигнала (shuffle).

В заключении рассматриваются перспективные направления развития сейсморазведки с вибрационными источниками, а также сформулированы выводы и рекомендации. Автор полагает, что с развитием технологий вибрационных источников псевдослучайные свип-сигналы могут занять важное место среди применяемых типов свип-сигналов. Будущее вибрационной сейсморазведки связано с разработкой высокомоощных вибрационных источников, низкочастотных и широкополосных адаптивных, а также высокопроизводительных технологий. В сочетании с новыми сейсмическими датчиками эти технологии будут определять дальнейшее развитие вибрационной сейсморазведки.

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, давно, как и поиск свип-сигналов, позволяющих повысить эффективность вибрационного метода.

Степень разработанности темы исследования

Развитие вибрационных источников в сейсморазведке началось с внедрения концепции сжатия импульсного сигнала, предложенной в ходе радиолокационных исследований, выполненных G. Guanella (1938) и E. Hittman (1940). Эта концепция впоследствии была развита в работах ученых Массачусетского технологического института (MIT), что позволило значительно улучшить разрешающую способность при сохранении необходимой дальнедействующей мощности. В результате стремления оптимизировать эти параметры была разработана методика преобразования длинных сигналов в короткие импульсы, адаптированная

для применения в наземных источниках. Революционный прорыв в этой области был сделан усилиями американских геофизиков Bill Dot и John Crawford (CONOCO). В результате их работы был создан новый тип вибрационного источника, который обеспечивал достаточную энергию возбуждения при ограничениях по мощности, что привело к значительным техническим и экономическим преимуществам. В 1960 году источник был успешно внедрен в нефтяную сейсморазведку, а в 1961 году компания SSL усовершенствовала методику корреляции длинных сигналов. Одновременно в СССР были разработаны вибрационные источники с эксцентриковым приводом, что, к концу 1970-х годов, позволило наладить серийное производство гидравлических вибрационных источников для нефтегазовой отрасли. Преимущества этих источников, такие как безопасность, экологичность, высокая эффективность и низкое энергопотребление, сыграли ключевую роль в их широком применении. Доля вибрационных источников в сейсморазведке увеличилась с 43% в США в 1975 году до 80% в мире к началу 2009 года.

Эволюция вибрационной сейсморазведки прошла три основные стадии. В 1950-х – конце 1960-х годов проводились эксперименты по разработке и полевым испытаниям вибрационных источников. В 1970-х – 1980-х годах, на стадии массового производства, использовались поочередные возбуждения, что позволяло достигать 300–500 возбуждений в день. С начала 1990-х годов, благодаря методам Flip-Flop sweep, Slip-Sweep, ISS и HFVS, производительность значительно возросла и превысила 20 000 возбуждений в день.

Первоначально в вибрационных источниках использовались линейные (ЛЧМ) свип-сигналы, которые применялись с 1950-х годов. Впоследствии были разработаны нелинейные свип-сигналы – степенные и логарифмические, что позволило компенсировать потери энергии в геологической среде и улучшить качество данных (Taozhifei, 2001). Концепция псевдослучайных свип-сигналов была впервые предложена в 1966 году Crook и Rieble, которые независимо разработали методы их генерации (Rieble, 1966; Crook et al., 1966). Позднее, в 1970-х годах, Cunningham (1979) показал, что использование псевдослучайных кодов значительно снижает уровень боковых лепестков. В 1976 году Goupillaud предложил метод создания псевдослучайных свип-сигналов, на основе модификации линейных свип-сигналов. В 1990-х годах Burger и Baliguet (1992) разработали методы управления вибраторами, которые позволили эффективно использовать эти сигналы в населённых пунктах. С развитием технологий 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 корректная настройка параметров этих сигналов обеспечивает высокое качество получаемых данных. Последующие исследования, проведённые 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, что такие сигналы,

благодаря узкому главному лепестку и уменьшенным боковым лепесткам автокорреляционных функций, обладают высокой помехоустойчивостью и являются важным инструментом современной сейсморазведки. Эти свип-сигналы также показали большой потенциал для применения в технологии ISS, минимизируя взаимные помехи одновременно работающих источников и повышая качество сейсмических 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

- Обработать и провести анализ сейсмических данных, полученных с использованием различных типов свип-сигналов, выбрать оптимальный сигнал для конкретного проекта.
- 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.
- 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, сопоставимую с традиционными линейными свип-сигналами, 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 сейморазведки, 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 глубинность 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.

Публикации и апробация работы

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались на международных конференциях и в ходе научно-практических семинаров: Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов -2021» (Москва, 2021), V Международная геолого-геофизическая конференция «ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии - наука и бизнес» (Москва, 2022), Сатпаевские чтения – 2022. тренды современных научных исследований (Алматы, Казахстан, 2022), 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme) (Осло, Норвегия, 2024).

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, включая 4 статьи в изданиях, рекомендованных для защиты в МГУ, а также тезисы докладов в сборниках трудов, индексируемых в РИНЦ. В работах, опубликованных в соавторстве, основополагающий вклад принадлежит соискателю.

Личный вклад автора

Автор принимал участие в научно-исследовательском проекте «Разработка теории и технологии комплексных геофизических исследований приповерхностной части разреза естественных и техногенных сред», 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.

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, 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.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Сейсморазведка является одним из ключевых методов нефтяной геологии и инженерной геофизики. С момента её появления сейсмические источники прошли эволюцию от взрывных к невзрывным, включая пневматические, электроискровые, электромагнитные и механические устройства, такие как ударные и вибрационные источники. Развитие конструкций сейсмических источников и электронных систем управления вибраторами привело к созданию множества различных типов свип-сигналов. С конца XX века для повышения эффективности вибрационной сейсморазведки были разработаны и внедрены различные высокопроизводительные методы. Настоящая глава посвящена наземной вибрационной сейсморазведке, её теоретическим основам и особенностям применения.

1.1. Обзор исследований технологии вибрационной сейсморазведки

Сейсморазведка, как один из ключевых методов геофизической разведки, использует сейсмические волны для изучения глубинного строения Земли и поиска полезных ископаемых. Основной принцип заключается в создании динамического воздействия на геологическую среду, вызывающего её упругие колебания и распространение сейсмических волн. В результате в земной коре формируются отражённые, преломлённые и другие типы волн, которые регистрируются сейсмоприёмниками для дальнейшего анализа структуры и состава геологических слоёв (Жуков и др., 2011).

Сейсмический источник является ключевым элементом технологии сейсморазведки, поскольку его характеристики напрямую влияют на качество получаемых данных. В настоящее время используются различные типы сейсмических источников, включая взрывные и невзрывные. К последним относятся пневматические, ударные, воздушные пушки, электроискровые и вибрационные источники.

Взрывные источники являются одним из наиболее распространённых типов источников в сейсморазведке, однако их использование сопряжено с рядом сложностей: необходимость бурения скважин, опасность транспортировки и эксплуатации, риск повреждения подземных коммуникаций, сооружений и дорог, а также затруднения при проведении работ вблизи городов и населённых пунктов (Lin, 2004). В связи с этим в 1950-х годах в СССР и США начались исследования вибрационных источников, развитие которых продолжается уже более 70 лет. Советский Союз первым разработал вибраторы с эксцентриковым колесом и провёл полевые

испытания, а также создал регистрирующую аппаратуру, методики полевых работ и обработки данных. Кроме того, была разработана технология вибрационной сейсморазведки на основе возбуждающего кодированного сигнала. К концу 1970-х годов в СССР вибрационные источники начали применяться в промышленности, что привело к серийному производству гидравлических вибраторов. В США американская нефтяная компания CONOCO в 1952 году начала эксперименты с методом непрерывных вибраций, при котором массивная вибрационная масса, жёстко сопряжённая с землёй через плиту, генерировала серию упругих волн. Обработка этих волн, прошедших через геологическую среду, позволяла получать информацию о строении пород, литологии и нефтегазоносности. Устройство, создающее непрерывные вибрационные сигналы, получило название вибрационный источник. В 1956 году в США был сформирован первый сейсморазведочный отряд, использовавший вибрационные источники. Однако, как и в СССР, их широкомасштабное промышленное применение началось только к концу 1970-х годов (Ni, 2012; Ni, 2014).

Технология вибрационной сейсморазведки прошла три основных этапа развития.

Первый этап – экспериментальный (1950-е – конец 1960-х годов).

На этом этапе основное внимание уделялось разработке систем вибрационных источников и проведению полевых испытаний для их совершенствования. В ходе экспериментов отрабатывались принципы генерации и регистрации вибрационных сигналов, а также методы обработки полученных данных.

Второй этап – массовое внедрение (начало 1970-х – конец 1980-х годов). Этот период часто называют этапом промышленного производства вибрационных источников. Вибрационные сейсмические установки начали использоваться в серийном производстве, что позволило применять многократные вибрационные источники, комбинированные для возбуждения сейсмических волн. Основным методом для получения сейсмических записей на этом этапе стала взаимная корреляция. Однако из-за последовательного режима возбуждения производительность оставалась относительно низкой – порядка 300–500 возбуждений в день.

Третий этап – внедрение адаптивных и высокопроизводительных методов (с начала 1990-х годов – настоящее время). В этот период были разработаны и внедрены различные высокопроизводительные методы для повышения эффективности сейсморазведки, такие как Flip-Flop Sweep, Slip-Sweep, Independent Simultaneous Sweeping (ISS) и High Fidelity Vibratory Seismic (HFVS). Благодаря этим технологиям производительность полевых работ значительно возросла, достигая более 20 000 возбуждений в день (Stewart et al., 1959).

История исследований вибрационных источников

Концепция вибрационных источников восходит к технологии эхолокации в радиолокационных системах. В работах швейцарского инженера G. Guanelle (1938) и немецкого

исследователя E. Hittman (1940) рассматривалось применение радиолокационных технологий. В Массачусетском технологическом институте (MIT) также активно велись исследования в данной области, и в 1959 году J.L. Stewart и E.C. Westerfield опубликовали классическую статью «Теория активного сонарного обнаружения» (*Theory of Active Sonar Detection*), а в 1960 году J.R. Klauder, A.C. Price, S. Darlington и W.J. Albersheim представили фундаментальную работу «Теория и проектирование линейных частотно-модулированных радаров» (*Theory and Design of Chirp Radars*) (Klauder et al., 1960). Интерес инженеров в области радиолокации к системам импульсного сжатия был обусловлен стремлением решить проблему увеличения дальности действия при сохранении высокой разрешающей способности. Для повышения разрешающей способности необходим короткий импульс, а для увеличения дальности – высокая энергетическая мощность сигнала. Однако это создавало необходимость в методе, позволяющем увеличить энергию сигнала без увеличения пиковой мощности. Оптимальным решением стала методика сжатия длинного сигнала в короткий импульс.

Такая же проблема возникла и у наземных источников: при их применении на дорожном покрытии необходимо передавать большую энергию для получения сигналов из глубин Земли, но при этом мощность не должна превышать определённый предел, чтобы не повредить поверхность дороги. Эту проблему решили геофизики из компании CONOCO (США) Bill Doty и John Crawford, применив технологию сжатия импульсов радаров и сонаров для создания нового типа источника – вибрационного источника. Это решение не только успешно справилось с поставленной задачей, но и принесло значительные экономические выгоды. После этого компания CONOCO потратила восемь лет и 8 миллионов долларов на разработку системы вибрационных источников. Лишь в конце 1960 года разработанная система вибрационного источника начала применяться для нефтяной сейсморазведки. В 1961 году компании SSL (Seismograph Service Limited) удалось успешно разработать коррелятор для сжатия длинных сигналов на короткие. Благодаря удобству использования вибрационных источников на дорогах, интерес к их усовершенствованию постоянно рос. К 1970-м годам их эффективность достигла уровня, сопоставимого с взрывными источниками, а сама технология стала значительно более надёжной. К началу 1980-х годов более половины наземных сейсморазведочных бригад в мире уже использовали вибрационные источники.

Из таблицы 1.1 видно, что технология вибрационных источников делает значительные шаги примерно каждые 10 лет. До 1970-х годов вибрационные источники, такие как советские гидравлические источники типа СВ, имели пиковой мощностью всего 10 000 фунтов и могли управлять фазой с точностью до 10°. Спустя 40 лет мощность вибрационных источников, например модели Nomad 90T французской компании Sercel, достигла 90 000 фунтов, а точность фазового управления улучшилась до 3°. Вибрационные источники с пиковой мощностью более

60 000 фунтов обычно относят к высокомоощным. На сегодняшний день основными производителями вибрационных источников являются французская компания Sercel, американская компания IVI, российская компания Geosvip, американская компания Seismic Source, китайская компания BASV, а также совместное китайско-американское предприятие Inova. В настоящее время пиковая мощность ведущих моделей вибрационных источников составляет 60 000 фунтов, а рабочий диапазон частот варьируется от 6 до 250 Гц.

Время	1960-е годы	1970-е годы	1980-е годы	1990-е годы	21-й век
Пиковая мощность (фунты)	10000	30000	50000	60000	90000
Контроль фазы (°)	10	10	10	3	3

Таблица 1.1. Пиковая мощность и прогресс фазового контроля вибрационных источников в разные годы.

На рис. 1.1 представлены несколько моделей вибрационных источников с разной пиковой мощностью. К основным техническим параметрам вибрационных источников относятся: пиковая выходная сила, максимальная статическая нагрузка, минимальная рабочая частота, вес реактивной массы, масса опорной плиты, а также тип и мощность ходового шасси, полная масса автомобиля, габариты, проходимость и другие характеристики. Блоки управления вибрационными источниками являются неотъемлемой частью оборудования и в настоящее время представлены сериями VIB PRO (INOVA), VE (Sercel) и GDS (Россия)

Из-за низкой частоты вибраций и громоздкости гидравлических вибрационных источников, которые затрудняют их использование для высокоразрешающей сейсморазведки на малых глубинах, а также с целью проведения инженерной сейсморазведки и статической коррекции для неглубоких нефтегазовых исследований, в 1989 году в Нидерландах Государственный университет Утрехта (Utrecht) разработал легкий электромеханический высокочастотный вибрационный источник с диапазоном частот от 1 до 1000 Гц, максимальной выходной мощностью 500 ньютонов, весом электрического блока управления 80 кг и весом вибратора 100 кг. В середине 1990-х годов японская компания OYO также выпустила легкий вибрационный источник с электромагнитным приводом. В начале 21 века Китайский университет Цзилиня (Jilin university) разработал электромагнитные вибрационные источники серии PHVS с пиковым усилием 500 ньютонов и 1000 ньютонов, диапазоном частот от 5 до 1400 Гц и точностью фазового контроля 3° и провел сравнительные испытания с ударным источником в Пекине, Тяньцзине и Чанчуне. В настоящее время серия PHVS продолжает развиваться в направлении

увеличения мощности и миниатюризации (Yang Zhichao, 2015).

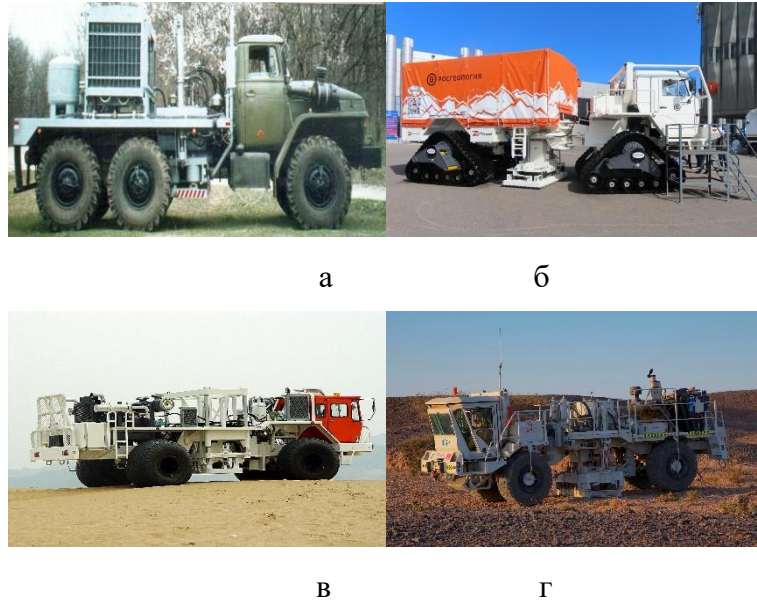


Рисунок 1.1. Четыре типичных вибрационных источника. (а) советский вибрационный источник СВ5 – 150М2 1970-х годов (пиковая мощность 26 000 фунтов) (<http://www.testmachines.ru/evolution/sv-5-150m2.html>), (б) российский вибрационный источник СВ-30М-3 (пиковая мощность 67 500 фунтов) (<https://www.bpu-cn.com/newsinfo/642880.html>), (в) китайский вибрационный источник KZ-28 (пиковая мощность 61 800 фунтов), (г) французский вибрационный источник Normad-90 (пиковая мощность 90 000 фунтов) (Yang Z., 2015).

История исследования свип-сигналов

Возбуждение сейсмического сигнала – первый этап сейсморазведки, и качество возбуждаемого сигнала определяет качество и разрешение сейсмических данных. В традиционной сейсморазведке с использованием взрывных источников разрешение данных зависит от разрешающей способности сейсмического вейвлета. В вибрационной сейсморазведке разрешение данных определяется разрешением автокорреляционной функции. Зарегистрированный сигнал является свёрткой свип-сигнала с фильтром земной коры. Форма автокорреляционной функции – важный фактор, влияющий на разрешение сейсмических данных. Исследование свип-сигналов вибрационных источников имеет ключевое значение для повышения качества разрешения в вибрационной сейсморазведке.

Изначально в вибрационной сейсморазведке использовался линейный свип-сигнал, разработанный на основе радиолокационной технологии, известный как ЛЧМ свип-сигнал. Усиленный сигнал возбуждал гидравлический вибратор, который через плотно сопряжённую с землей плиту передавал вибрации в грунт. При достижении подземных геологических границ сигналы отражались и регистрировались геофонами, установленными на поверхности. Взаимная корреляция между исходным свип-сигналом и записанным сигналом от геофонов позволяет

получить коррелограммы, которые используются для дальнейшей обработки (Ristow et al., 1975; Sallas et al., 1998; Allen et al., 1998).

На сегодняшний день свип-сигналы вибрационных источников значительно эволюционировали, начиная от первоначального линейного (ЛЧМ) свип-сигнала и до множества других типов. В зависимости от характеристик сигнала их можно классифицировать на три основные категории: линейные, нелинейные и псевдослучайные свип-сигналы.

Линейный свип-сигнал характеризуется линейным изменением мгновенной частоты во времени при относительно стабильной амплитуде. Благодаря простоте генерации и лёгкости управления линейный свип-сигнал остаётся наиболее распространённым типом в современных сейсморазведочных работах, обеспечивая стабильность и надёжность при проведении полевых исследований.

Нелинейные свип-сигналы характеризуются изменением мгновенной частоты и амплитуды, которые являются нелинейными монотонными функциями времени с переменной скоростью частотных изменений. В настоящее время применяются различные виды нелинейных свип-сигналов, такие как экспоненциальные, логарифмические, степенные (по времени), адаптивные, низкочастотные, а также dB/Oct, dB/Hz и T-Power. Каждый из этих типов ориентирован на компенсацию потерь энергии на определённых частотах, обусловленных нелинейными фильтрационными эффектами в геологической среде, что играет ключевую роль в повышении разрешающей способности сейсмических данных. Проектирование нелинейных свип-сигналов основывается на снижении скорости изменения мгновенной частоты в нужном диапазоне для компенсации потерь энергии и увеличения времени воздействия на определённые частотные компоненты. Такой подход позволяет добиться значительного улучшения качества данных в сейсморазведке, особенно при целенаправленном исследовании конкретных геологических структур. Использование этих сигналов обеспечивает более детализированное изображение подземных слоёв, повышая тем самым эффективность и результативность разведочных работ (Taozhifei, 2001).

Псевдослучайные свип-сигналы представляют собой класс сигналов, обладающих характеристиками белого шума и высокой степенью ортогональности, с минимальными боковыми лепестками автокорреляционной функции. В пределах заданного частотного диапазона мгновенная частота псевдослучайных сигналов изменяется случайным образом, что делает их эффективным инструментом для сейсморазведки, особенно в сложных условиях. Существует пять ключевых типов таких сигналов: свёртка двоичной последовательности, фильтрация двоичной последовательности, импульсная развертка, перестановка свип-сигнала и генерация недвоичных случайных чисел. Первоначально псевдослучайные свип-сигналы разрабатывались с целью минимизации боковых лепестков автокорреляционной функции, что улучшает

разрешающую способность сейсмических данных и снижает риск резонансного взаимодействия с наземными сооружениями. Сегодня, с ростом популярности высокопроизводительных методов вибрационной сейсморазведки, такие сигналы стали важным элементом для подавления шумов, возникающих при регистрации данных, что позволяет минимизировать шумы уже на этапе сбора данных (Rieble et al., 1966; Crook et al., 1966; Dean, 2014; Bagaini, 2010; Li Hongyan, 2015).

В современных сейсморазведочных проектах ключевым этапом является выбор параметров свип-сигнала, который должен учитывать специфические характеристики исследуемой области и требования к качеству собираемых данных. Особенно важным аспектом является оптимизация псевдослучайных свип-сигналов, что стало предметом широких исследований и разработок в последние десятилетия. На данный момент технологии проектирования свип-сигналов достигли значительного уровня зрелости. Однако на практике многие из этих сигналов не всегда дают ожидаемые результаты. Это подчёркивает необходимость дальнейших исследований и совершенствования подходов к проектированию свип-сигналов, чтобы обеспечить более точные и эффективные данные для сейсморазведки.

История разработки и исследования вибросейсмических методов

Вибросейсмические методы можно разделить, как минимум на две основные категории: традиционные и высокопроизводительные методы. В данном разделе подробно рассматривается текущее состояние этих методов с акцентом на их особенности и преимущества.

(1) Традиционные вибросейсмические методы

Традиционные вибросейсмические методы основаны на использовании одного или нескольких вибрационных источников как правило с применением ЛЧМ свип-сигнала для возбуждения сейсмических волн в полевых условиях, с последующей регистрацией сигналов наземными геофонами. Традиционные вибросейсмические методы особенно эффективны в двухмерных сейсморазведочных исследованиях и ограниченных трехмерных проектах. С момента их появления в XX веке и до начала XXI века они оставались основным методом вибрационной сейсморазведки.

(2) Высокопроизводительные вибросейсмические методы

Высокопроизводительные вибросейсмические методы направлены на повышение эффективности сейсморазведочных работ, что позволяет снизить затраты на сейсморазведку. В отличие от традиционных методов, главным преимуществом высокопроизводительных методов является снижение затрат на производство полевых работ. Однако такие методы зачастую сопровождаются помехами от соседних групп вибрационных источников, а также гармоническими искажениями, что требует дополнительных этапов шумоподавления на стадии обработки (Hampson, 2008; Bathellier et al., 2012).

С конца XX века, с углублением разведочных работ и повышением требований к

детализации сейсмических изображений нефтегазовых пластов, нефтяные компании активно разрабатывают и внедряют высокопроизводительные вибросейсмические технологии (Moerig et al., 2002; Krohn et al., 2004). Среди ключевых достижений можно выделить: В 1996 году компания PDO (Оман) представила две методики: Flip-flop и Slip-sweep. Полевые испытания показали значительное увеличение производительности по сравнению с традиционным методом при сохранении высокого качества сейсмических данных. В 1998 году компания CGG Veritas применила метод Slip-sweep в реальных проектах, что ознаменовало переход этой технологии на новый уровень зрелости. Однако метод имеет ограничение по количеству одновременно работающих источников (до четырёх), что сдерживает его производительность. В 2006 году компания BP разработала метод независимого одновременного возбуждения (ISS – Independent Simultaneous Sweeping) и успешно протестировала его в Алжире. Данная методика позволила значительно увеличить количество возбуждений в сутки (Qu, 2018; Howe et al., 2008; Howe et al., 2009). В 2008 году CGG Veritas представила метод V1, который позволил избежать потерь разрешающей способности при одновременном возбуждении, повысив производительность за счёт более плотного размещения источников и сокращения временных интервалов между их активациями. Однако данный метод требует дополнительной обработки из-за значительных помех. В 2009 году BP разработала метод дистанционного одновременного возбуждения (DSSS – Distance Separated Simultaneous Sweeping), который позволил сместить помехи за пределы целевого временного окна (Postel et al., 2008; Bouska, 2009; Bouska, 2010). В 2008 году Hampson представил метод Dithered acquisition, а позднее компания Schlumberger разработала технологию Dithered Slip Sweep (DSS), комбинирующую Dithered acquisition и Slip-sweep, что позволило добиться ещё большей производительности и точности (Bagaini, 2010; Bagaini и Ji, 2010).

Метод Flip-flop, по сравнению с традиционным методом, требует использования двух или более вибрационных источников. Пока одна группа вибрационных источников осуществляет возбуждение, следующая группа перемещается к следующей точке возбуждения и подготавливается к работе. По завершении возбуждения одной группы следующая группа немедленно начинает вибрацию.

Метод Slip-sweep был разработан на основе метода Flip-flop. Его главное отличие заключается в том, что время работы нескольких групп вибрационных источников может пересекаться, что увеличивает общую производительность.

Метод ISS (Independent Simultaneous Sweeping) представляет собой высокоэффективную технологию, основанную на использовании нескольких групп вибрационных источников. Каждая группа начинает возбуждение сразу после подготовки, без ожидания других групп. Однако данный метод приводит к возникновению значительных помех от соседних групп источников, что снижает отношение сигнал/шум в полученных данных.

Memod DSSS (Distance Separated Simultaneous Sweeping) предполагает использование нескольких групп вибрационных источников в полевых условиях, при этом между группами применяется чередующийся режим Flip-flop. Каждая группа состоит как минимум из двух подгрупп вибрационных источников, расположенных на определённом расстоянии друг от друга, что позволяет минимизировать помехи от соседних групп. Однако в полученных данных нижние части всё же остаются под влиянием этих помех.

Для борьбы с помехами от соседних групп источников, возникающими при использовании высокопроизводительных методов, было разработано множество подходов к шумоподавлению. На практике данные сначала преобразуются из сейсмограммы ОПВ в другие типы сейсмограмм, затем помехи устраняются стандартными методами подавления случайного шума, после чего данные возвращаются в формат сейсмограммы ОПВ для дальнейшей обработки.

История исследования разделения смешанных сейсмических данных

Из-за низкой эффективности традиционных вибросейсмических методов высокопроизводительные методы становятся всё более популярными, значительно увеличивая эффективность сейсмических работ. Однако это влечет за собой проблему разделения смешанных данных (Spitz et al., 2008; Abma et al., 2010; Chen et al., 2014; Tang et al., 2009; Jiang et al., 2010).

В настоящее время существуют нескольких методов разделения смешанных данных. Основной метод включает преобразование сейсмограммы ОПВ в другие типы сейсмограмм, например, в сейсмограммы ОСТ или другие наборы. Затем помехи от соседних групп источников рассматриваются как шум, который подавляется с помощью методов фильтрации (Chen et al., 2014; Hampson et al., 2008; Mahdad et al., 2011; Wapenaar et al., 2012; Chen et al., 2014; Zu et al., 2017; Denisov et al., 2021). Метод кодирования позволяет уменьшить когерентность между смешанными данными, улучшая отношение сигнал/шум при их разделении и визуализации. Поскольку сигналы, излучаемые вибрационным источником, управляемы, метод кодирования является подходящим для вибросейсмических работ.

История разработки методов моделирования вибрационных данных

В настоящее время исследований, посвящённых прямому моделированию с использованием вибрационных источников, относительно мало. Методы, применяемые для такого моделирования, аналогичны методам моделирования импульсных источников, при этом основным методом является метод конечных разностей. В 2006 году Ван Чжунжэнь и соавтор впервые использовали линейный (ЛЧМ) свип-сигнал для численного моделирования двухмерной сейсморазведки. Для подавления лепестков функции автокорреляции они применили конусообразную обработку на начале и конце свип-сигнала и также провели численное моделирование для ряда нелинейных свип-сигналов (Wang et al., 2006). В 2007 году Ван Чжунжэнь и Чай ЧжиЮань провели численное моделирование для псевдослучайных свип-

сигналов (Wang et al., 2007). В 2011 году Ван и соавтор провели исследование прямого моделирования для вибрационных данных в Таримском бассейне (Wang et al., 2010). В 2014 году Цю Иньмин предложил метод быстрого моделирования с несколькими вибрационными источниками для метода V1 (Qu et al., 2014).

1.2. Принцип работы вибрационного источника

Принцип сейсморазведки с использованием вибрационного и взрывного источников схож: сейсмические трассы, полученные с обоих типов источников, могут быть описаны через свёрточную модель. Основное различие между ними заключается в длительности сигнала. Вибрационный источник генерирует свип-сигнал, который требует взаимной корреляции для получения коррелограммы (сейсмической записи), что позволяет затем провести дальнейшую обработку и интерпретацию. Взрывной источник создает импульсный сигнал, и соответствующая сейсмическая трасса может быть непосредственно описана с помощью свёрточной модели. В данной части рассматриваются принцип работы вибрационного источника, генерация вибрационных сейсмических данных, технология взаимной корреляции и свёрточная модель, при этом технология взаимной корреляции является ключевым элементом вибрационной сейсморазведки.

Вибрационные источники обладают рядом преимуществ перед взрывными, включая отсутствие повреждений дорожного покрытия, управляемость формой свип-сигнала и экологичность. Хотя принцип их работы схож с принципом импульсных источников, вибрационные источники используют длительный низкоэнергетический свип-сигнал вместо кратковременного высокоэнергетического импульса. Это позволяет избежать ударных волн, характерных для импульсных источников, и минимизировать воздействие на поверхность, что делает вибрационные источники более безопасными для окружающей среды.

Вибрационные источники классифицируются по типу возбуждаемых сейсмических волн: продольные, поперечные и комбинированные, с наибольшим применением продольных. Система вибрационного источника включает электронное управление, гидравлическую сервосистему, силовой и передающий блоки, а также вспомогательные компоненты (рис. 1.2). Основные элементы системы можно разделить на три ключевые части: генератор свип-сигнала, вибратор и коррелятор.

Генератор свип-сигнала, или кодировщик, представляет собой устройство, предназначенное для формирования свип-сигнала. Обычно кодировщик устанавливается на сейсмическом оборудовании, размещенном на специализированном автомобиле. Его основная функция заключается в создании опорного свип-сигнала и передаче его на вибрационные

источники, что позволяет последним генерировать свип-сигналы, соответствующие переданному опорному сигналу. Кроме того, генератор управляет временем начала работы всех вибрационных источников и осуществляет мониторинг качества сейсморазведочных работ через радиосвязь, получая в реальном времени данные от источников.

Вибратор является основным компонентом системы вибрационного источника, генерирующим вибрационные сигналы с изменяющейся частотой и амплитудой в соответствии с опорным сигналом. Структура вибрационного источника включает систему привода, вибрационную систему, систему управления и вспомогательные компоненты. Вибратор, центральный элемент вибрационной системы, состоит из возбуждателя вибрации, вибрационной гидравлической системы и электронной системы управления. Механическое ядро вибратора – это возбуждатель, который включает реактивную массу, плиту, электро-гидравлический серво-клапан, центровочную воздушную пружину и виброизолирующие пружины. Свип-сигнал передается в землю через плиту, обеспечивая эффективное распространение волн. Гидравлическая система снабжает вибратор гидравлическим маслом, поддерживая его бесперебойную работу, а электронный блок управления координирует взаимодействие всех компонентов.

Коррелятор выполняет основную функцию взаимной корреляции между исходными данными и опорным свип-сигналом, созданным кодировщиком, с последующим суммированием для получения коррелограммы. В настоящее время отдельные корреляторы почти не используются, поскольку корреляция и суммирование выполняются с помощью специализированного программного обеспечения.



а

б

в

Рисунок 1.2. Основные компоненты вибрационного источника NOMAD90 компании SERCEL (Франция). (а) вибрационный источник NOMAD90, (б) вибратор вибрационного источника, (в) электрический блок управления вибрационного источника VE464 (Ni Y., 2012).

Теоретические основы вибрационного и взрывного источников идентичны: отражённое сейсмическое волновое поле, полученное с помощью обоих типов источников, может быть описано с использованием свёрточной модели. Сигнал, генерируемый взрывным источником, приближен к импульсному, что позволяет непосредственно использовать свёрточную модель для представления соответствующей сейсмической трассы. В отличие от него, вибрационный

источник генерирует длительный свип-сигнал, который необходимо обработать методом взаимной корреляции для выделения и сжатия геологической информации, получаемой из вибрационной записи, в результате чего получается коррелограмма. В этом случае сейсмическую трассу можно представить как свёртку функции автокорреляции свип-сигнала с импульсной характеристикой последовательности коэффициентов отражения.

Свёрточная модель предполагает, что подземные пласты имеют горизонтально-слоистую структуру, а источник генерирует плоские продольные волны, распространяющиеся перпендикулярно вниз. В этом случае сейсмическую запись, полученную от взрывного источника, можно описать через свёрточную модель следующим образом:

$$x(t) = w(t) * r(t) + n(t) \quad (1.1)$$

В данном уравнении: $x(t)$ – записанная сейсмическая трасса, $w(t)$ – сейсмический вейвлет, $r(t)$ – импульсные характеристики слоев, а $n(t)$ – шум.

При тех же условиях сейсмическая трасса от вибрационного источника (коррелограмма) может быть представлена с помощью уравнения (1.1). Однако в этом случае $w(t)$ – это автокорреляция свип-сигнала. Пусть $s(t)$ – свип-сигнал, а $s'(t)$ – исходная виброграмма. Свип-сигнал $s(t)$ представляет собой непрерывный длинный сигнал, амплитуда и частота которого зависят от времени. Проходя через подземные слои и взаимодействуя с ними, этот сигнал формирует длинную вибрационную запись (виброграмму) $s'(t)$, которая может быть описана уравнением (1.2).

$$s'(t) = s(t) * r(t) \quad (1.2)$$

В данном уравнении $s'(t)$ представляет собой вибрационную запись, $s(t)$ – свип-сигнал, а $r(t)$ – импульсные характеристики слоев, которая эквивалентна коэффициентам отражения слоев.

$s'(t)$, полученный из вышеуказанного уравнения, называется вибрационной записью. Этот длинный непрерывный сигнал представляет собой сложную комбинацию импульсных откликов одного и того же слоя на сигналы с различным временем и частотой. Он содержит различные шумы, такие как поверхностные волны, помехи от сейсмического оборудования и другие. Для суммирования результатов свертки сигналов с разными частотами и временами с импульсной характеристикой слоя, а также для их упорядочивания по глубине слоев во времени, необходимо сжать длину сигнала. Обычно для этого используется операция взаимной корреляции. После выполнения взаимной корреляции свип-сигнала $s(t)$ с вибрационной записью $s'(t)$ и добавления шума $n(t)$ получается уравнение (1.3), аналогичное уравнению (1.1):

$$x(t) = k(t) * r(t) + n(t) \quad (1.3)$$

Здесь $k(t)$ – нулевой фазовый вейвлет, также известный как вейвлет Klauder, который представляет собой автокорреляционную функцию свип-сигнала $s(t)$. Уравнения (2.1) и (2.3)

имеют идентичную структуру, а нулевой фазовый вейвлет $k(t)$ может быть преобразован в минимально фазовый вейвлет $w(t)$ с помощи фазового сдвига. Таким образом, можно сделать вывод, что принципы работы вибрационной сейсморазведки и сейсморазведки с взрывным источником являются аналогичными.

Сейсмические записи:

В уравнении (1.3) $x(t)$ в левой части представляет собой сейсмическую трассу, зарегистрированную при использовании вибрационного источника. Объединяя все такие трассы, полученные в ходе одного возбуждения, можно сформировать полную коррелограмму.

На рис. 1.3 представлены различные типы сейсмических записей: рис. 1.3 (а) иллюстрирует исходную вибрационную запись (виброграмму), рис. 1.3 (б) показывает сейсмическую запись (коррелограмму), полученную в результате свёртки виброграммы с соответствующим свип-сигналом, рис. 1.3 (в) демонстрирует сейсмическую запись, зарегистрированную при одном возбуждении от взрывного источника.

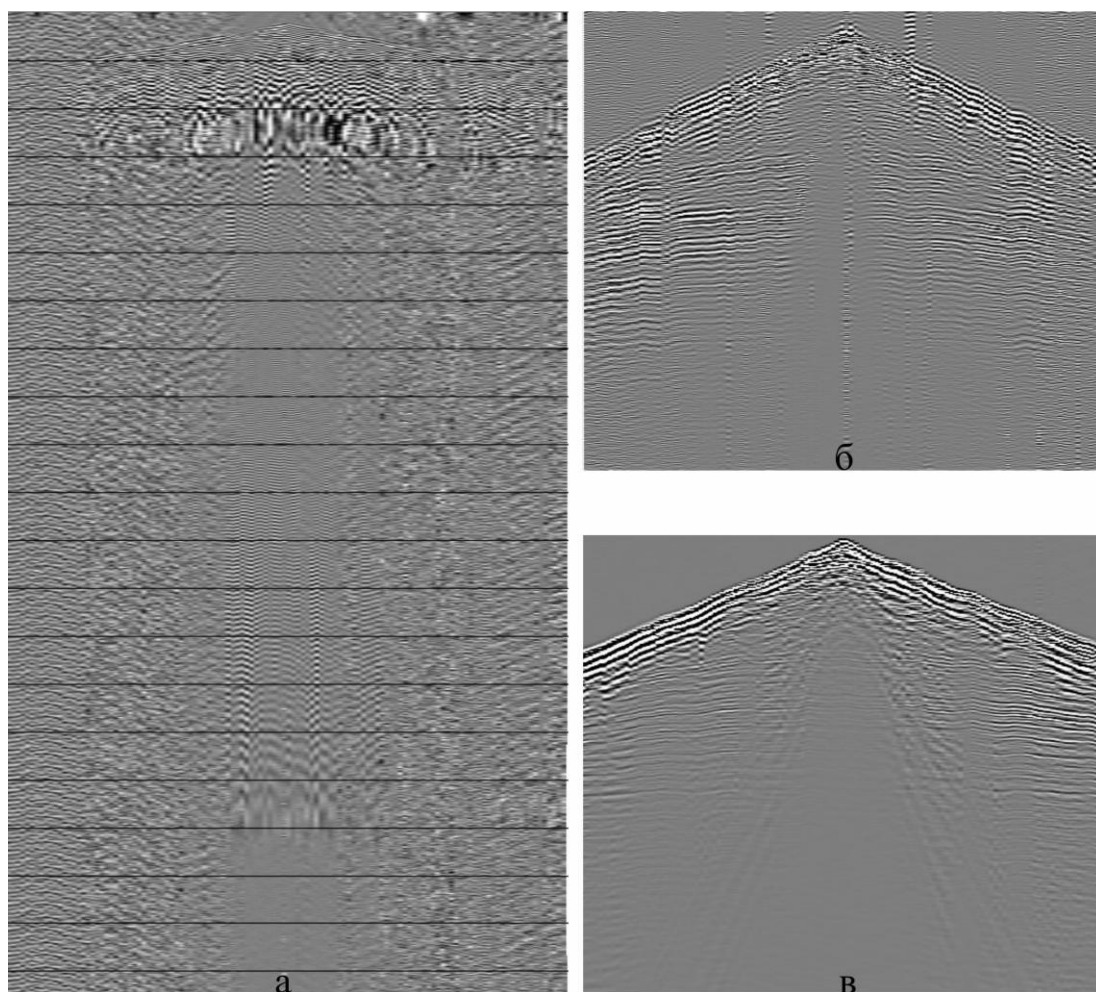


Рисунок 1.3. Типичные сейсмические записи от вибрационного и взрывного источников. (а) вибрационная запись (виброграмма), длительность – 20.5 с, (б) коррелограмма, длительность – 4 с, (в) сейсмограмма от взрывного источника, длительность – 4 с.

Вибрационная запись (виброграмма), представлена на рис. 1.3 (а). Это сложное волновое поле, которое не может быть непосредственно обработано как сейсмограммы. Чтобы получить запись, аналогичную записи взрывного источника (рис. 1.3 (б)), необходимо выполнить взаимную корреляцию с свип-сигналом. Однако физическое значение записей 1.3 (б) и 1.3 (в) принципиально различно. Запись 1.3 (б) фиксирует данные, полученные в результате математической операции, и не отражает реальное движение частиц в недрах Земли. Тем не менее, она сохраняет важную геологическую информацию, такую как время распространения сейсмических волн, интенсивность энергии отражённых волн и полярные характеристики. Запись 1.3(в), напротив, отображает реальное движение частиц в недрах Земли, обладает наглядным геофизическим значением и может быть непосредственно обработана и потом интерпретирована.

В верхней части волнового поля записи 1.3(б) наблюдается схожесть с полем первого вступления записи, полученной от взрывного источника (рис. 1.3 (в)). Это объясняется тем, что результат взаимной корреляции обладает нулевой фазой, что приводит к появлению симметричного шума вокруг экстремальных точек. В отличие от этого, поле первого вступления записи 1.3(в) не содержит подобного шума, так как возбуждение сейсмических волн взрывным источником и последующее движение частиц в недрах Земли находятся в строгой причинно-следственной связи. Это делает полученную запись минимально фазовой. Для вибрационного источника границы слоёв на записи соответствуют положению максимума функции взаимной корреляции. Это совпадает с точкой начала движения частиц в записи, полученной с использованием взрывного источника, что подтверждает аналогию между двумя методами возбуждения.

Корреляция:

Уравнения (1.2) и (1.3) описывают принцип формирования коррелограммы вибрационной сейсморазведки. Взаимная корреляция между свип-сигналом и виброграммой позволяет получить сейсмическую запись (коррелограмму), которая представляет собой результат математической операции. Метод взаимной корреляции является основой вибрационной сейсморазведки. Сейсмическая трасса вибрационной сейсморазведки $x(t)$ может быть представлена в виде интегральной формы (формула 1.4):

$$x(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T s'(t)s(t - \tau)dt \quad (1.4)$$

В данном выражении $x(t)$ обозначает коррелограмму вибрационной сейсморазведки, $s'(t)$ представляет виброграмму, а $s(t - \tau)$ представляет свип-сигнал, с которым выполняется взаимная корреляция. T , указывает на длительность свип-сигнала, а τ представляет временной сдвиг при выполнении взаимной корреляции.

В данном случае пренебрегается нелинейным поглощением и затуханием различных частотных компонентов свип-сигнала при прохождении через земную среду. Предполагается, что амплитуды всех частотных компонентов свип-сигнала изменяются одинаково при его свёртке с импульсной характеристикой границы волнового импеданса. Таким образом, $x'(t)$ может быть представлено как свёртка свип-сигнала с импульсной характеристикой волнового импеданса в форме интегрального выражения, представленном в уравнении (1.5).

$$x'(t) = \int_0^{\infty} \delta(\theta) s(t - \theta) d\theta \quad (1.5)$$

В данном выражении $\delta(\theta)$ обозначает импульсную характеристику границы волнового импеданса в земной среде, $s(t - \theta)$ представляет собой свип-сигнал, а θ указывает на временную глубину границы волнового импеданса.

В результате подстановки уравнения (1.5) в уравнение (1.4) и изменения порядка интегрирования получается альтернативная интегральная форма для выражения коррелограммы вибрационной сейсморазведки, представленная уравнением (1.6).

$$x(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \delta(\theta) \int_0^{\infty} s(t + \tau) s(t - \theta) d\theta = \int_0^{\infty} \delta(\theta) k(\tau - \theta) d\theta \quad (1.6)$$

В данном выражении $k(\tau - \theta) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t - \theta) s(t + \tau) dt$ обозначает автокорреляционную функцию свип-сигнала, которая представляет собой нульфазовую волну, известную как волна Klauder.

В качестве примера процесса получения коррелограммы с использованием операции взаимной корреляции рассмотрим модель с тремя границами различного волнового импеданса. На рис. 1.4 (а) изображена содержащая три границы с различными значениями волнового импеданса, каждая из которых имеет свою импульсную характеристику δ_1 , δ_2 , δ_3 . На рис. 1.4 (б) показан процесс формирования коррелограммы вибрационной сейсморазведки.

На рис. 1.4 вибграаммы $s'_1(t)$, $s'_2(t)$, $s'_3(t)$ представлены как записи, зафиксированные геофоном после свёртки линейного свип-сигнала $s(t)$ с импульсными характеристиками δ_1 , δ_2 , δ_3 соответственно. Эти вибграаммы демонстрируют изменения амплитуды при постоянной частоте. Время начала регистрации t_1 , t_2 , t_3 для записей $s'_1(t)$, $s'_2(t)$, $s'_3(t)$ совпадает с временем t_1 , t_2 , t_3 на геофизической модели на рис. 1.4 (а). Коррелированные сейсмические записи $x'_1(t)$, $x'_2(t)$, $x'_3(t)$, полученные в результате взаимной корреляции $s(t)$ с $s'_1(t)$, $s'_2(t)$, $s'_3(t)$, дают максимумы, которые соответствуют временным импульсам. В рис. 1.4 (б) вибграамма $s'(t)$ представляет собой реальную запись вибрационной сейсморазведки, зафиксированную геофоном, которая является суммой вибграамм $s'_1(t)$, $s'_2(t)$, $s'_3(t)$. Результат корреляции между $s(t)$ и $s'(t)$ приводит к формированию коррелированных сейсмических записей.

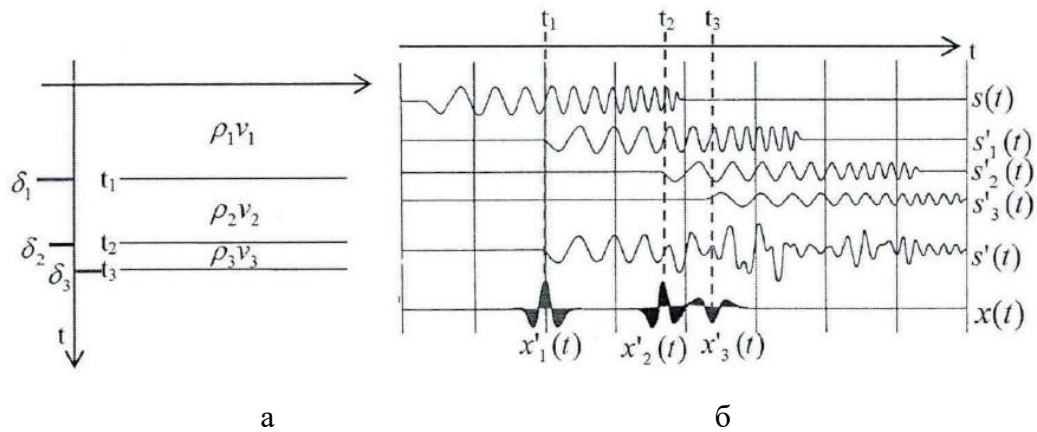


Рисунок 1.4. Схема формирования коррелограммы вибрационной сейсморазведки. (а) Геофизическая модель с несколькими слоями, (б) иллюстрация процесса взаимной корреляции (Ni Y., 2014).

1.3. Свип-сигналы

В традиционной сейсморазведке с использованием взрывных источников разрешающая способность сейсмических данных определяется характеристиками сейсмического импульса. Вибрационная сейсморазведка, напротив, характеризуется тем, что разрешающая способность данных зависит от свойств функции автокорреляции. В процессе обработки данных функция автокорреляции формируется в результате взаимной корреляции (cross-correlation) между свип-сигналом и отражённым сигналом, зарегистрированным геофоном. Отражённый сигнал, в свою очередь, представляет собой свёртку свип-сигнала с фильтрующим эффектом геологической среды. Разрешающая способность функции автокорреляции определяется его формой: если основное экстремальное значение выражено отчётливо, а боковые лепестки минимальны, то разрешающая способность будет высокой, в противном случае она снижается. Таким образом, автокорреляционная функция свип-сигнала является ключевым фактором, влияющим на разрешающую способность сейсмических данных. Поэтому исследование свойств свип-сигналов играет важную роль в повышении качества сейсмических данных.

Вибрационная сейсморазведка основана на принципах технологии радара. В этой технологии радарный передатчик излучает ЛЧМ свип-сигналы (сигналы с линейной частотной модуляцией), которые, сталкиваясь с объектами в пространстве, отражаются и возвращаются в виде эхосигнала, принимаемого радаром. Процесс взаимной корреляции между переданным и отражённым сигналами позволяет определить временную задержку, связанную с двусторонним временем распространения сигнала. Теоретически принимаемый сигнал можно рассматривать как результат двустороннего распространения переданного сигнала, что даёт возможность, анализируя пик взаимной корреляции и его временные координаты, вычислить время

распространения туда и обратно. Затем, зная скорость распространения электромагнитных волн в среде, можно рассчитать расстояние от радара до отражающего объекта.

Изначально в вибрационной сейсморазведке в качестве свип-сигналов использовались Chirp-сигналы. После усиления мощности эти сигналы управляли гидравлическим вибратором, который через опорную плиту передавал вибрацию в Землю. Отражённые от подземных границ сигналы принимались массивом геофонов, установленным на поверхности. С помощью взаимной корреляции между исходным свип-сигналом и эхосигналом формировались временные разрезы сейсмических данных, на основе которых, зная скорость распространения сейсмических волн в геологической среде, рассчитывались положения отражающих границ.

Однако, несмотря на эффективность ЛЧМ свип-сигналов, их применение выявило ряд ограничений. В частности, значительные боковые лепестки автокорреляционной функции таких сигналов снижали разрешающую способность полученных данных. Кроме того, линейные свип-сигналы использовали одинаковое время сканирования для всех частотных диапазонов, что приводило к равномерному распределению энергетической нагрузки. Это, в свою очередь, вызывало сильное затухание высоких частот в подземных средах и снижало соотношение сигнал/шум, негативно влияя на разрешающую способность данных. Дальнейшие исследования показали, что затухание и поглощение сейсмических волн в подземных средах имеют нелинейный характер. Для улучшения распространения высоких частот в таких условиях был предложен метод нелинейного сканирования, при котором частотное изменение сигнала обратно пропорционально коэффициенту затухания среды. Наибольшее распространение получили два типа нелинейных свип-сигналов – с экспоненциальным и логарифмическим изменением частоты, что способствовало улучшению качества получаемых сейсмических данных.

Линейные и нелинейные свип-сигналы относятся к методам частотно-модулированного (ЧМ) сканирования, в процессе которого при корреляционной обработке часто возникает "корреляционный шум". Для его подавления в конце 1970-х годов Werner и Kreu предложили так называемый метод совместного сканирования, основанный на использовании нескольких коротких свип-сигналов, охватывающих различные частотные диапазоны, вместо одного длинного свип-сигнала. Данный метод предполагал многократное перекрытие на высоких частотах для компенсации их затухания, что позволило улучшить подавление корреляционного шума и компенсировать потерю высокочастотных компонент в сейсмических данных (Werner et al., 1979). В том же году Bernhardt и Peacock представили метод кодированного сканирования, основанный на присваивании полярности каждому сегменту сканирования в рамках метода совместного сканирования. Это превращало их в кодовые (или "битовые") элементы, которые затем комбинировались в определённой последовательности кодирования. Такой подход эффективно минимизировал шум, вызванный перекрытием корреляций между свип-сигналами

(Bernhardt et al., 1978).

В 1979 году Cunningham предложил псевдослучайные свип-сигналы, основанные на использовании последовательностей с определённой периодичностью, но с сохранением случайности внутри каждого периода. Такая структура псевдослучайных последовательностей позволяет их автокорреляционной функции быть близкой к автокорреляционной функции белого шума – импульсной функции. При корректной обработке можно полностью устранить боковые лепестки автокорреляционной функции псевдослучайной последовательности, что делает данный метод перспективным для дальнейшего развития. Однако в предложенной Cunningham методике, где положительные и отрицательные кодовые элементы представляются фазовыми инверсиями, возникает проблема реализации фазовых скачков на практике из-за механических ограничений гидравлических вибрационных источников (Cunningham, 1979). В последние годы, с развитием технологий вибрационных источников, особенно с появлением электромеханических вибраторов, стало возможным осуществление фазовых скачков в реальных условиях.

1.3.1. Линейный свип-сигнал

В вибрационной сейсморазведке сканирование представляет собой непрерывный колебательный сигнал с постоянной амплитудой, мгновенная частота которого изменяется монотонно во времени. Линейный свип-сигнал является частным случаем, когда мгновенная частота изменяется линейно во времени. Математическое выражение линейного свип-сигнала можно представить следующим образом:

$$S(t) = A \sin 2\pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{2T} t \right) t \quad (1.7)$$

$$(0 \leq t < T)$$

В приведённом выше уравнении A обозначает амплитуду сигнала, $\Delta f = F_2 - F_1$ – абсолютную ширину частотного диапазона свип-сигнала, T – время сканирования, t – время начала записи, F_1 и F_2 – начальную и конечную частоты соответственно. Центрированная частота определяется как $f_0 = (F_2 + F_1)/2$. Основными параметрами линейного свип-сигнала являются центрированная частота f_0 , время сканирования T и ширина частотного диапазона Δf . Относительная ширина частотного диапазона свип-сигнала вычисляется по формуле $R = \frac{F_2}{F_1}$, а в октавных единицах выражается как $R_{oct} = \log_2 \frac{F_2}{F_1}$.

На рис. 1.5 (а) показан линейный свип-сигнал, на рисунке 1.5 (б) – его амплитудный спектр, а на рис. 1.5 (в) – его временно-частотная характеристика. Из представленных графиков видно, что частота свип-сигнала линейно увеличивается с течением времени. Длительность свип-сигнала составляет 12 секунд, начальная частота – 8 Гц, конечная частота – 86 Гц. Длина конуса сигнала составляет 0,5 секунды. Скорость изменения частоты составляет 6,5 Гц/с, абсолютная

ширина частотного диапазона – 78 Гц, а относительная ширина частотного диапазона равна 3,4 октавы.

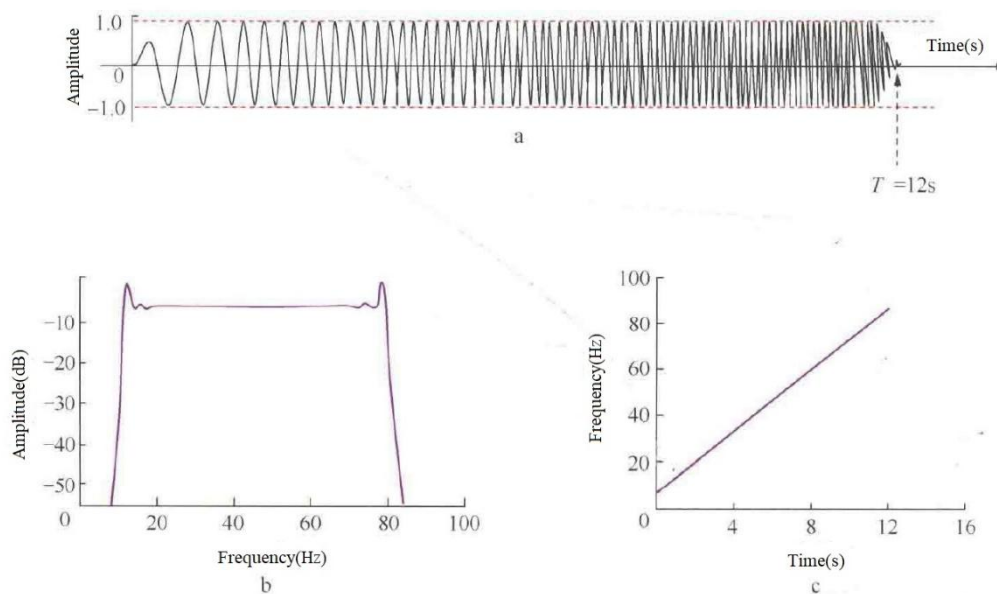


Рисунок 1.5. (а) Линейный свип-сигнал, (б) его амплитудный спектр, (в) временно-частотная характеристика (Ni Y., 2014).

Автокорреляционная функция линейного свип-сигнала $s(t)$ приближённо выражается следующим образом:

$$\Phi(\tau) = \frac{A^2 T \sin \pi \Delta f \tau}{2 \pi \Delta f \tau} \cos 2\pi \left(f_0 + \frac{\Delta f}{2T}\tau\right) \tau \quad (1.8)$$

$$0 \leq \tau \leq T$$

В уравнении (1.8) символ τ обозначает приведённое время записи. Это выражение является результатом произведения постоянной величины, затухающей огибающей $\frac{\sin x}{x}$ и косинусного компонента.

На рис. 1.6 сплошная линия представляет автокорреляционную функцию свип-сигнала, а пунктирная линия – её затухающую огибающую. Согласно уравнению (1.8), значения функции обращаются в ноль при целых значениях, кратных $\frac{1}{\Delta f}$. Колебания внутри затухающей огибающей определяются косинусной составляющей. Основная часть автокорреляционной функции сосредоточена в интервале $(-\frac{1}{\Delta f}, \frac{1}{\Delta f})$, который соответствует главному лепестку. Вне этого диапазона функция образует боковые лепестки, являющиеся источником шума, вызванного самим свип-сигналом (*signal-generated noise*), поскольку их форма определяется характеристиками свип-сигнала. Для автокорреляционной функции линейного свип-сигнала, изображённой на рис. 1.6, амплитуда первого бокового лепестка достигает 22% от амплитуды

главного лепестка, а второго – 13%.

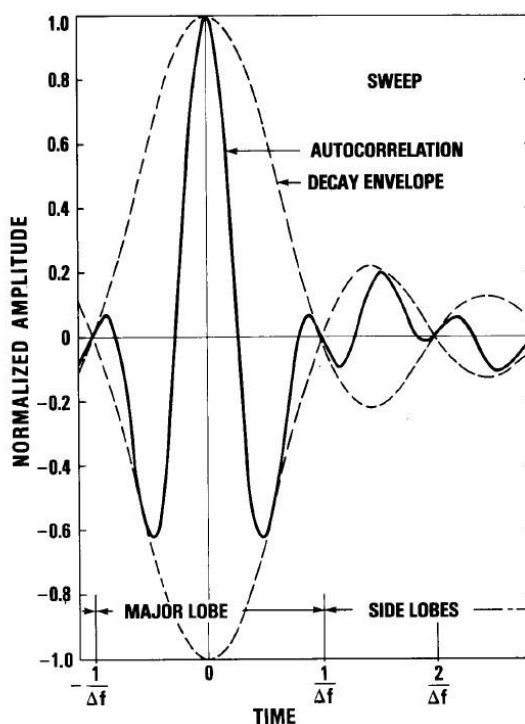


Рисунок 1.6. Автокорреляционная функция свип-сигнала (Cunningham A.B., 1979).

Линейные свип-сигналы удобны для настройки параметров и контроля фазы. Их использование на различных типах поверхностей обеспечивает согласованность взаимосвязанных волн, что делает их основным типом сигналов в вибрационной сейсморазведке. Однако линейные свип-сигналы имеют и ряд ограничений. В частности, они не учитывают эффект поглощения сигнала при его распространении через земную среду, не компенсируют частотно-зависимое поглощение в различных слоях земной коры, а также характеризуются относительно высокими боковыми лепестками в автокорреляционной функции.

1.3.2. Нелинейные свип-сигналы

Компенсация потерь энергии в определённых частотных диапазонах, вызванных нелинейным откликом грунта на свип-сигналы, остаётся важной областью инженерных исследований. Использование нелинейных свип-сигналов позволяет частично восполнить эти потери энергии. Нелинейный свип-сигнал характеризуется тем, что мгновенная амплитуда и частота изменяются по нелинейным монотонным законам времени, при этом скорость изменения частоты остаётся непостоянной. В 1976 году Pierre L. Goupillaud в своей статье «SIGNAL DESIGN IN THE "VIBROSEIS" TECHNIQUE» указал на преимущества нелинейных свип-сигналов. Примеры, приведённые в его работе, показали, что такие сигналы позволяют компенсировать потери энергии в нужных частотных диапазонах путём корректировки скорости

изменения мгновенной частоты (Goupillaud, 1976). В 1985 году Harry Mayne в статье «Method and apparatus for seismic exploration using nonlinear sweeps» представил логарифмический свип-сигнал, разработанный для «универсального свип-сигнала» компании Geosource. Mayne подчеркнул, что «избыточное усилие нецелесообразно в низкочастотном диапазоне, где затухание невелико» (Mayne et al., 1985). В 1987 году Лян Сюэнь проанализировал методы проектирования нелинейных свип-сигналов и указал на ключевые аспекты их разработки, такие как адаптация параметров для различных участков рабочей области и необходимость учёта низкочастотной составляющей сигнала.

Нелинейные свип-сигналы включают экспоненциальные, отрицательные экспоненциальные, логарифмические, обратные линейные, а также dB/Гц, dB/октава, T^n и другие методы. Хотя различные виды нелинейных свип-сигналов обладают разными характеристиками, их параметры настраиваются таким образом, чтобы компенсировать потери энергии в низкочастотных, высокочастотных и основных отражённых частотах, возникающие из-за нелинейного отклика среды. При проектировании нелинейных свип-сигналов энергия может компенсироваться за счёт уменьшения скорости изменения мгновенной частоты в нужном диапазоне частот и увеличения времени сканирования в этом диапазоне. В методах вибрационной сейсморазведки передаваемая энергия накапливается по мере интеграции во времени. При фиксированной общей длительности сканирования общая передаваемая энергия остаётся постоянной, поэтому увеличение энергии в компенсируемом диапазоне (за счёт снижения скорости сканирования и увеличения времени сканирования) приводит к уменьшению энергии на других частотах. Упрощённое уравнение может быть использовано для описания нелинейных свип-сигналов:

$$s(t) = A(t) \sin \left[2\pi \int f(t) dt \right], 0 \leq t \leq T \quad (1.9)$$

В этом уравнении: $s(t)$ представляет собой нелинейный свип-сигнал, $A(t)$ – огибающую функцию нелинейного свип-сигнала, которая может совпадать с огибающей функцией линейного свип-сигнала, $f(t)$ – мгновенную частоту, являющаяся монотонной нелинейной функцией времени, T обозначает продолжительность свип-сигнала.

Для обсуждения методов компенсации низкочастотных энергетических компонентов используется степенная функция. В уравнении (1.10) представлена функциональная зависимость между мгновенной частотой $f(t)$ и временной переменной t , предложенная компанией Pelton.

$$f(t) = F_1 + (F_2 - F_1) \left(\frac{t}{T} \right)^n \quad (1.10)$$

Интегрируя функцию $f(t)$ и подставляя результат в уравнение (1.9), можно выразить нелинейный свип-сигнал в виде степенной функции, как показано ниже:

$$s(t) = A(t) \sin 2\pi \int f(t) dt = A(t) \sin 2\pi \left[F_1 t + \frac{\Delta F T}{n+1} \left(\frac{t}{T} \right)^{n+1} \right] \quad (1.11)$$

В данном уравнении значение n определяет скорость изменения частоты. Для данного примера $n = 3$, тип функции конусообразования свип-сигнала выбран с использованием функции Blackman, с начальной и конечной частотами 6 Гц и 80 Гц соответственно. Длительность свип-сигнала составляет 12 с, а длина начальной и конечной частей конуса – по 250 мс.

На рис. 1.7 (а) показан свип-сигнал, на котором трудно визуализировать изменение частоты, однако тип конусообразования отличается от показанного на рис. 1.5 (а). На рис. 1.7 (б) приведен его амплитудный спектр, где заметно улучшение энергии низкочастотных компонентов (менее 30 Гц), что способствует компенсации низкочастотной энергии и повышению глубины отражений. Рис. 1.7 (в) демонстрирует временно-частотную зависимость, на которой видно, что изменение частоты нелинейно, при этом скорость изменения частоты на низких частотах меньше, чем на высоких.

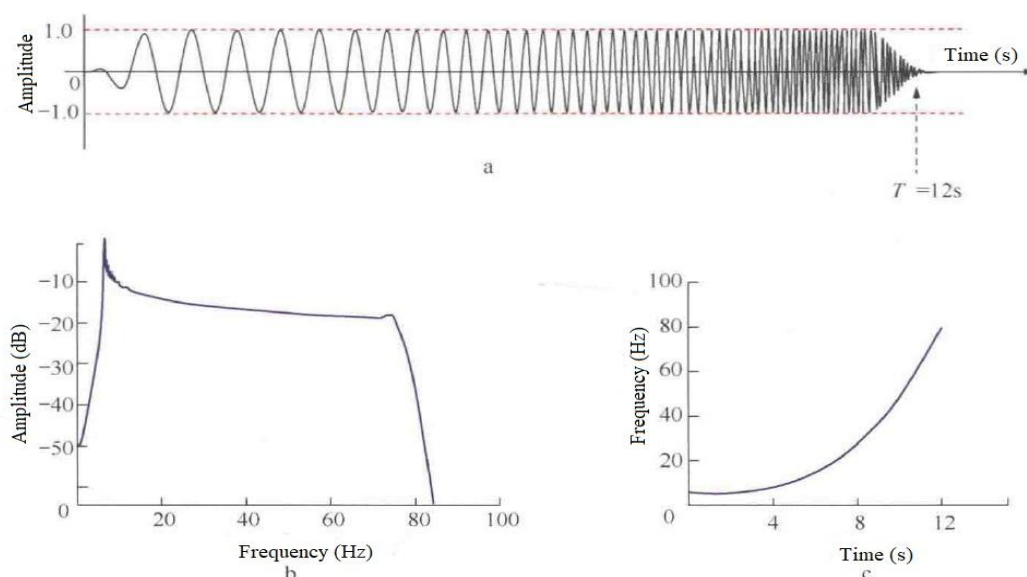


Рисунок 1.7. (а) Нелинейный свип-сигнал, (б) Амплитудный спектр нелинейного свип-сигнала, (в) Зависимость частоты от времени для нелинейного свип-сигнала (Ni Y., 2014).

Затем мы применяем логарифмическую функцию для рассмотрения компенсации энергии высокочастотных компонентов. Уравнение (1.12) описывает ещё одну функциональную зависимость между мгновенной частотой $f(t)$ и временной переменной t , предложенную компанией Pelton.

$$f(t) = F_1 + \frac{20}{k \ln 10} \ln \left\{ 1 + \frac{1}{T} \left[e^{\frac{k(F_2 - F_1) \ln 10}{20}} - 1 \right] \right\} \quad (1.12)$$

После выполнения интегрирования функции $f(t)$ и подстановки полученного результата в уравнение (2.9) можно выразить нелинейный свип-сигнал через логарифмическую функцию, а

именно:

$$s(t) = \sin 2\pi \left\{ F_1 t + \frac{b(1+mt)}{m} [\ln(1+mt) - 1] \right\} \quad (1.13)$$

В уравнении (2.12) значение k определяет скорость изменения частоты. В уравнении (1.13) параметры принимают следующие значения: $b = \frac{20}{k \ln 10}$, $c = F_2 - F_1 = \Delta F$, $m = (e^{\frac{c}{b}} - 1)/T$. В данной работе принято значение $k = 0.5$. Тип конусообразной функции свип-сигнала соответствует функции Blackman, с начальной частотой 6 Гц и конечной частотой 80 Гц. Длительность свип-сигнала составляет 12 секунд, а продолжительность начальной и конечной частей конусообразной функции – 0,25 с.

Рис. 1.8 (а) представляет временную форму нелинейного свип-сигнала, из которой трудно оценить скорость изменения частоты. Тип конусообразной функции совпадает с типом, использованным на рис. 1.5 (а). Рис. 1.8 (б) показывает амплитудный спектр свип-сигнала, на котором видно, что энергия компонентов с частотой выше 20 Гц возрастает линейно с увеличением частоты, что способствует компенсации энергии высокочастотных составляющих и улучшает разрешающую способность сейсмических данных. Рис. 1.8 (в) изображает зависимость частоты от времени, на которой видно, что изменение частоты происходит нелинейно, при этом скорость изменения частоты в высокочастотной области меньше, чем в низкочастотной.

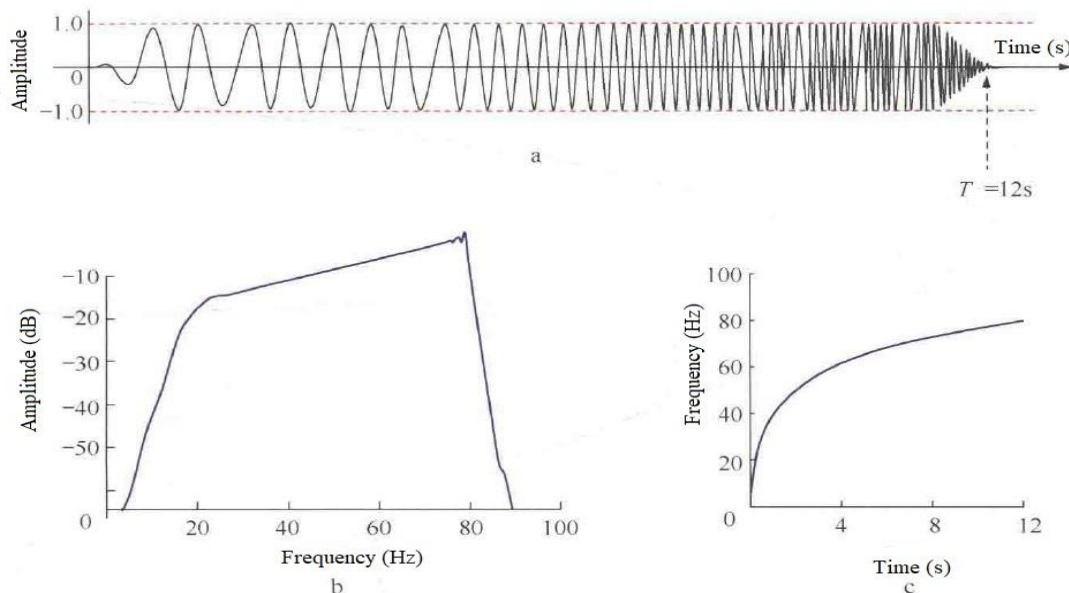


Рисунок 1.8. (а) Нелинейный свип-сигнал, (б) амплитудный спектр нелинейного свип-сигнала, (в) зависимость частоты от времени нелинейного свип-сигнала (Ni Y., 2014).

1.3.3. Псевдослучайные свип-сигналы

Сейсмическая запись вибрационной сейсморазведки обычно получается путем взаимной корреляции свип-сигнала с виброграммой, что описано в уравнении (1.3). Взаимная корреляция

является методом оценки степени сходства между двумя сигналами, однако в процессе корреляции возникает корреляционный шум, который может существенно снизить разрешающую способность сейсмических данных. Это происходит из-за боковых лепестков автокорреляционной функции свип-сигнала, которые вносят шум в сигналы на больших расстояниях. Данный шум может быть особенно заметен в частотных диапазонах, где сигнал имеет низкую амплитуду, что ограничивает точность и качество обработки сейсмических данных.

Псевдослучайные свип-сигналы обладают хорошей автокорреляционной функцией, которая имеет периодический характер, но в пределах одного периода сигнал остается случайным. Их автокорреляционная функция близка к характеристикам импульсной функции, что обеспечивает высокую предсказуемость и устойчивость к помехам. Это позволяет эффективно разделять такие сигналы от шума из соседних групп источников. Использование псевдослучайных последовательностей для создания свип-сигналов позволяет значительно уменьшить энергию боковых лепестков в процессе взаимной корреляции, что способствует снижению влияния корреляционного шума. Кроме того, спектр псевдослучайных свип-сигналов похож на спектр белого шума, что делает их подходящими для использования в районах с высокой плотностью застройки. Это открывает хорошие перспективы для их применения в сейсморазведке, как было отмечено в исследовании Ward et al. (1990). В этих районах традиционные методы могут сталкиваться с трудностями из-за сильных помех, возникающих от окружающих объектов. Псевдослучайные свип-сигналы, благодаря своим характеристикам, позволяют существенно улучшить качество данных и точность интерпретации. В частности, использование таких сигналов в сочетании с методами подавления шума и усовершенствованными алгоритмами обработки данных позволяет значительно повысить эффективность сейсморазведки, особенно в условиях сложных геологических и урбанизированных областей. С учетом этого, псевдослучайные свип-сигналы становятся незаменимыми в современных подходах к сейсморазведке, открывая новые возможности для точных и эффективных исследований.

Однако, учитывая чрезвычайно актуальную задачу повышения производительности вибросейсмических работ на первый план выходит свойство некоррелируемости псевдослучайных свип-сигналов, что позволяет их эффективно использовать для решения этой задачи.

Подробное описание классификации псевдослучайных свип-сигналов и их характеристик будет приведено в третьей главе.

ГЛАВА 2. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ СВИП-СИГНАЛОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОПЫТНО-МЕТОДИЧЕСКИХ РАБОТ НА АГКМ¹

Фильтрационное воздействие земной среды может приводить к потере энергии сейсмических сигналов в определённых частотных диапазонах. Для компенсации этого эффекта, повышения соотношения сигнал/шум и увеличения разрешающей способности сейсмических данных необходимо разрабатывать свип-сигналы, адаптированные к конкретным геологическим условиям. В данной главе рассматривается процесс выбора оптимального свип-сигнала для исследования соляно-купольной структуры на левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения. Описаны используемые типы свип-сигналов, их параметры, а также единый процесс обработки и интерпретации сейсмических данных. Приведённый пример демонстрирует процесс подбора оптимального свип-сигнала для проведения крупномасштабной сейсморазведки в сложных геологических условиях.

2.1. Общее сведение района исследований

Прикаспийская впадина, расположенная в пределах Восточно-Европейской платформы, является одним из крупнейших нефтегазоносных регионов с высоким потенциалом углеводородных ресурсов. Этот потенциал подтверждается открытием значительных месторождений нефти и газового конденсата как в подсолёвых, так и в надсолёвых отложениях (Ван и др., 2022).

С 1950-х годов в юго-западной части Каспийского бассейна, на территории Астраханской области, активно применяются различные геофизические методы для разведки нефти и газа. По состоянию на 2009 год в регионе было разведано около 20 крупных месторождений нефти, газа и газового конденсата (Быстрова и др., 2017; Демидова и др., 2016).

Исследуемый участок расположен в пределах Каспийского бассейна, на западном борту Актюбинско-Астраханской зоны поднятий, на левобережье реки Волги. Конкретное местоположение участка обозначено красной стрелкой на рис. 2.1.

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. **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)).

Литолого-стратиграфическая характеристика разреза

В геологическом строении изучаемого участка, расположенного в юго-западной части Прикаспийской впадины, принимают участие отложения палеозойский, мезозойской и кайнозойской групп. Фундамент не вскрыт скважинами, но по данным сейсморазведки его глубина составляет 9000-12000 м. Он имеет сложное блоковое строение.

Самыми древними являются терригенно-карбонатные отложения девонской системы. Они охарактеризованы в скважине 1–Правобережная и ряде скважин Астраханского свода, где их общая толщина превышает 1600 м. Средний девон (эйфельский ярус): состоит из глинистых и алевролитистых известняков с прослоями аргиллитов и алевролитов. Толщина отложений достигает 200 м. Верхний девон (франский и фаменский ярусы): объединяет карбонатные породы общей толщиной свыше 1000 м. Франский ярус: в основании — серые известняки, выше — толща доломитов. Фаменский ярус: преобладают среднекристаллические доломиты, выше по разрезу — доломитизированные известняки, толщина до 477 м.

Каменноугольные отложения залегают согласно на девонских, их общая толщина 1270 м. Нижний отдел (турнейский, визейский и серпуховский ярусы): толщина 1000 м. Турнейский ярус: представлен известняками с прослоями кремнистых пород, толщина 231 м. Визейский ярус: сложен органогенно-детритовыми известняками с пропластками аргиллитов, толщина 587 м. Серпуховский ярус: состоит из слабоглинистых известняков с маломощными прослоями ангидритов, толщина варьирует от 26 до 182 м. Средний отдел (нижнебашкирский подъярус): объединяет три горизонта: краснополянский (известняки), северо-кельтменский (известняки с прослоями аргиллитов) и прикамский (темно-серые известняки).

Пермская система перекрывает башкирский ярус с несогласием. Сакмарский и артинский ярусы: рассматриваются совместно, их толщина 50-170 м. Разрез представлен переслаиванием битуминозных аргиллитов, глинистых и пелитоморфных известняков. Кунгурский ярус: подразделяется на нижнюю (карбонатно-терригенно-сульфатную) и верхнюю (галогенно-сульфатную) толщи. Разрез сильно не выдержан по толщине и литологическому составу. В соляных грядках толщина превышает 3,5 км (в основном каменная соль). Верхний отдел: толщины варьируют от 0 до 1000 м в зависимости от положения по отношению к соляным куполам. Например, в скважине 1-Правобережная, расположенной на соляном куполе, отложения верхнего отдела перми, триаса и юры отсутствуют.

Триасовая система: континентальная гравийно-песчано-глинистая толща, толщина 0-1500 м.

Юрская система: преимущественно мелководно-морские осадки, толщина 100-900 м.

Меловая система: чередование глин, алевролитов и глауконитовых песчаников раннемелового возраста (300-600 м), а также карбонатные отложения поздне мелового возраста

(до 600 м).

Палеогеновая система: толщина 0-300 м. Разрез сложен терригенными породами (глины, песчаники).

Неогеновая и четвертичная системы: развиты повсеместно, толщина 300-900 м. Состоят из континентальных отложений: глин, песчаников, суглинков (Бондарь и др., 2006).

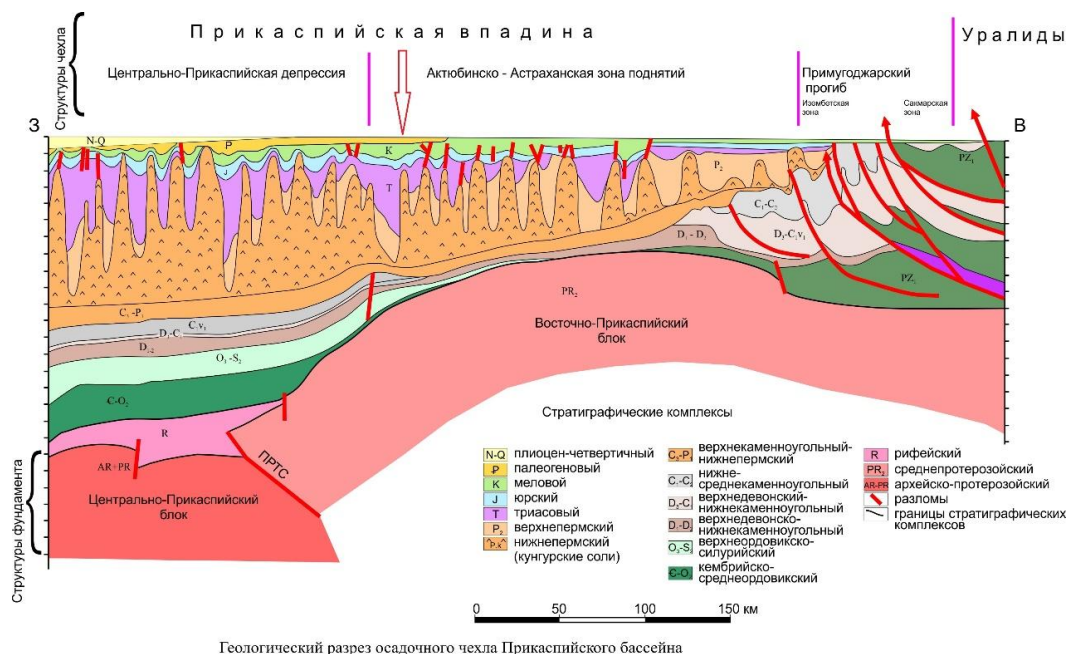


Рисунок 2.1. Каспийский бассейн с указанием района проведения разведочных работ (отмечен красной стрелкой) (Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция /под редакцией Ю.Г.Леонова, Ю.А.Воложа. М.: Научный мир, 2004).

Географические и гидрологические условия

Исследуемый участок расположен в непосредственной близости от реки Волги. На его территории отсутствуют постоянные водотоки. Встречаются лишь эпизодически расположенные солёные озёра дождевого питания, которые пересыхают в летний период.

Левобережный район характеризуется равнинным рельефом, осложнённым грядами незакреплённых и полужакреплённых барханных песков. Абсолютные отметки территории преимущественно находятся ниже уровня мирового океана.

Климатические особенности

Климат района резко континентальный, что выражается в значительных колебаниях температур, низком количестве осадков и высокой испаряемости. Территория относится к подзоне южной полупустыни.

Среднегодовая температура воздуха составляет около +10 °С. Самый холодный месяц – январь, когда средняя температура снижается до –9 °С, а в отдельные дни может достигать –20 °С.

Самый тёплый месяц – июль, со средней температурой $+24 - +25^{\circ}\text{C}$ и максимальными значениями до $+40^{\circ}\text{C}$. Разница температур между самым холодным и самым тёплым месяцами достигает $29^{\circ}\text{C} - 34^{\circ}\text{C}$, что подтверждает высокую континентальность климата.

Годовая сумма осадков составляет около 180–200 мм. Основное их количество выпадает в холодный период года, что в сочетании с высокой испаряемостью приводит к засушливости лета (Великанов и др., 2014).

Система	Отдел	Ярус	Отражающий горизонт	Мощность, м	Литологическая колонка	Краткая характеристика
Юрская - Меловая-К	N+Q			0-368		Переслаивание глин светло-серых, песчаников светло-серых, слабосцементированных. В верхней части разреза чередование песков, супыликов и глин.
	P		K ₂	300-900		Переслаивание темно-серых, зеленовато-серых глин, алевролитов и серых, кварцевых песчаников. В разрезе на разных уровнях встречаются редкие прослои светло-серых рыхлых известняков.
		Нижний - K	K ₁	0-600		Неравномерное переслаивание мелкозернистых и мелоподобных известняков с малоощупными прослоями известковых песчаников, глин и мергелей.
			J _{2b}	0-600		Неравномерное чередование серых и зеленоватых глин, алевролитов и глауконитовых песчаников с конкрециями фосфорита и сидерита.
Триасовая-Т	J _{2a3}			0-560		Неравномерное переслаивание глин, песчаников и алевролитов.
				0-1500		Переслаивание красновато-коричневых, прослоями и пятнами зеленовато-серых, серых глин и алевролитов с прослоями песков, песчаников, реже конгломератов и бурых углей. Песчаники горизонтально - и косослоистые.
	Пермская - P	Верхний - P ₂		0-1000		Неравномерное чередование красновато-коричневых и зеленовато-серых глин, алевролитов и песчаников. В нижней части встречаются ангидриты, содержащие примесь глинистого материала.
		Нижний - P ₁	Кунгурский (P _{1k})	128-3500		Переслаивание каменной соли и ангидритов. Каменная соль белая, прозрачная, иногда серая с красноватым оттенком за счет примесей, плотная, крепкая, насыщенная. Ангидриты серые, голубовато - серые, мелкокристаллические, плотные, крепкие, трещиноватые; в нижней части разреза - с примесью глинистого материала и прослоями доломитизированных известняков, доломитов.
Каменноугольная - C	P _{1a+ag}	IP		50-170		Известники от светло - до темно-серых, пелитоморфно - микрозернистые и биокластовые участками доломитизированные, неравномерно глинисто - битуминозные. В разрезе отмечены прослои аргиллитов зеленовато-серых, тонкослоистых.
	Средний - C ₂	Башкирский (C _{2b})		115-280		Известники светло-серые, буровато-серые, темно-серые, массивные и горизонтально-слоистые, биокластовые и лито-биокластовые, от плотных, крепких, слабо трещиноватых до пористых и кавернозных, со стилолитовыми швами, с тонкими пленками битума, с прослоями (особенно в основании разреза) черных тонкослоистых аргиллитов.
		C ₃		26-171		Известники светло-серые, буровато - серые, биокластовые, преимущественно кринокидно-фораминиферо-водорослевые, прослоями доломитизированные. Характерно наличие тонких микротрещин, стилолитовых швов.
	Нижний - C ₁	Визейский (C _{1v})		до 640		Известники серые, биокластовые, фораминиферо-кринокидно-мшановые участками водорослевые перекристаллизованные, трещиноватые, с суфуро-стилолитовыми швами. Известники в отдельных прослоях пропитаны битуминозным веществом. В нижней части разреза (нижевизейский подъярус) среди известняков преобладают темно-серые, плотные, крепкие, преимущественно глинистые разности, с прослоями темно-серых и черных аргиллитов.
Девонская - D	Татарский (C _{1t})			до 195		Известники темно-серые, мелко-среднекристаллические, биокластовые, частично перекристаллизованные, трещиноватые, участками доломитизированные. В разрезе встречаются пропласты аргиллита черного, плотного, слабоизвесткового. В отложениях присутствует дисперсное глинисто-битуминозное вещество и примазки черного битума.
	Верхний - D ₃	Фракийский (D _{3f})	IIIГ'	0-505		В верхней части разреза известники серые и темно-серые, в различной степени доломитизированные, слабоглинистые, скрывто - мелкокристаллические, плотные и трещиноватые, участками с включением глинисто-битуминозного вещества. Вниз по разрезу известники переходят в доломиты серые темно-серые до черных, среднекристаллические, трещиноватые, кавернозные.
		Франский (D _{2f})	IIIГ'	до 600		Известники от серых до темно-серых, скрывто - мелко- и среднекристаллической структуры, неравномерно доломитизированные (до перехода в доломиты), трещиноватые, с тонкими пропластками аргиллитов, послойно обогащенные битуминозным материалом. В нижней части разреза развита толща известняков серых, мелкокристаллических, плотных трещиноватых, глинистых. В породах содержится разнообразный детрит беспозвоночных - остракод, криноидей, брахиопод, мшанок, встречаются фрагменты водорослей Givvanelia.
	Средний - D ₁	Эйфельский (D _{1ef})		> 65		Известники темно-серые, черные, глинистые, с пропластками аргиллитов темно-серых, черных, слабо-известковых.

Рисунок 2.2. Сводный литолого-стратиграфический разрез Правобережного участка и сопредельных территорий.

Ветровой режим

Ветровой режим района определяется общими циркуляционными процессами атмосферы. Среднегодовое атмосферное давление при температуре 0 °С составляет 765 мм рт. ст. В зимний период давление повышается до 770 мм рт. ст., а в летний – снижается до 760 мм рт. ст.

Район большую часть года находится под влиянием отрога Сибирского антициклона, что приводит к преобладанию восточных, юго-восточных и северо-восточных ветров:

- Летом эти ветры способствуют высоким температурам, сухости и запылённости воздуха.
- Зимой они создают холодную и ясную погоду.
- В период с апреля по август часто наблюдаются суховеи, сопровождающиеся высокими температурами.

Средняя скорость ветра составляет 4–8 м/с, однако в отдельные периоды может достигать 12–20 м/с и более.

2.2. Геолого-геофизическая изученность

Поисково-разведочные работы на нефть и газ в Астраханской области начались еще в 1940-х годах. Планомерные геолого-геофизические исследования юго-западной части Прикаспийской впадины стартовали в начале 1950-х годов, что положило основу для детального изучения региона.

С 1968 года на территории Астраханского выступа Астраханская геофизическая экспедиция начала сейсморазведочные работы методом МОВ. Уже с 1973 года проводились исследования методом ОГТ с использованием сейсмостанции «Прогресс».

Важным событием стало открытие крупного газоконденсатного месторождения в августе 1976 года. В разведочной скважине 5-Астраханская, расположенной в 6 км северо-восточнее станции Досанг, был получен первый промышленный фонтан газа с конденсатом из башкирских отложений среднего карбона. Газоносный горизонт залегает на глубине 3900–4100 м, а дебит газа достигает 400 тыс. м³/сут.

Большая часть месторождения (около 65%) находится на левобережье рек Волга и Ахтуба, остальная часть – в пойме указанных рек и на правобережье. В 2017 году, с целью уточнения геологического строения подсолевых отложений, прогноза пространственного положения предполагаемых залежей и выработки рекомендаций по заложению поисково-разведочных скважин, ОАО «Оренбургская геофизическая экспедиция» провело сейсморазведочные работы 2D МОГТ на левобережном участке Астраханского свода.

2.3. Параметры 2D съёмки сейсмических работ

В данной главе представлены результаты опытно-методических исследований, проведённых на левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения. Основной целью работы было определение оптимального свип-сигнала и его сравнение с результатами, полученными при использовании взрывного источника. 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 – стандартный свип-сигнал в сейсморазведке.
- Адаптивный свип-сигнал – формируется с учетом характеристики геологических условий.
- Низкочастотный свип-сигнал – предназначен для увеличения глубины проникновения сейсмического сигнала.
- Широкополосный свип-сигнал – используется для расширения частотного диапазона сейсмических данных.

В эксперименте был применён метод 2D-МОГТ. Для проведения сейсморазведочных работ с использованием как взрывных, так и вибрационных источников применялась единая система наблюдения. Параметры съёмки для каждого типа источника приведены в таблицах 2.1 и 2.2.

При взрывном возбуждении использовались заряды массой от 0,8 до 2,0 кг. Параметры съёмки следующие: шаг ВП – 60 метров, шаг ПП – 30 метров, 240 каналов в активной расстановке, максимальную кратность – 60, длину записи – 18 секунд. Профиль был пройден с применением взрывного источника полевой партией Астраханской геофизической экспедиции.

Затем данный профиль был повторно пройден полевой вибрационной партией АО «ТНГ-ГРУПП» с аналогичными параметрами расстановки. Для вибрационных работ использовались: шаг ВП – 60 метров, шаг ПП – 30 метров, 240 каналов в активной расстановке, максимальная кратность – 61, длина записи – 6 секунд, 4 накопления.

В ходе вибрационных работ тестировались четыре типа свип-сигналов: линейный, адаптивный, низкочастотный, широкополосный. Их параметры приведены ниже.

Вид работ	МОГТ 2D
Шаг ПВ, м	60
Шаг ПП, м	30
Кол-во каналов в активной расстановке	240

Мин. и максимальное удаление ПВ-ПП, м	30 и 7200
Максимальная кратность	60
Способ возбуждения сейсмических колебаний	Взрывной
Глубина заложения заряда, м	23
Вес заряда, кг	0.8 – 2.0
Тип сейсмоприемников	GS-20DX
Кол-во сейсмоприемников в группе	12
Вид группирования	линейный
База группирования приемников, м	30
Тип сеймостанции	Прогресс-Т2
Шаг дискретизации, мс	2
Длина записи, с	18
Формат записи	SEG-D

Таблица 2.1. Параметры 2D-съёмки при использовании взрывных источников

Вид работ	МОГТ 2D			
Шаг ПВ, м	60			
Шаг ПП, м	30			
Кол-во каналов в активной расстановке	240			
Мин. и максимальное удаление ПВ-ПП, м	30 и 7230			
Максимальная кратность	61			
Способ возбуждения сейсмических колебаний	Вибрационный			
Тип вибрационных источников	Nomad 65			
Система управления вибрационными источниками	GDS-II			
Кол-во источников в группе	4			
База группирования источников, м	36			
Усилие воздействия, %	60			
Тип свип-сигнала	линейный	адаптивный	низкочастотный	широкополосный

Начальная частота, Гц	6	8	3	3
Граничная частота, Гц	-	-	6	6
Конечная частота, Гц	100	96	96	96
Параметр нелинейности, дБ/Гц, %	-	15 %	-	0.1 дБ/Гц
Длина свип-сигнала, с	12	12	16	16
Конус, с	0.75 / 0.5	0.5 / 0.5	1.0 / 0.5	1.0 / 0.5
Кол-во накоплений	4	1+4	4	4
Тип сейсмоприемников	GS-20DX			
Кол-во сейсмоприемников в группе	12			
Вид группирования	линейный			
База группирования приемников, м	25			
Тип сейсмостанции	Sercel 428 XL			
Шаг дискретизации, мс	2			
Длина записи, с	6			
Формат записи	SEG-D			
Объём работ	1625 ф.н. (5 * 285 ф.н. + 2 * 100 ф.н.)			

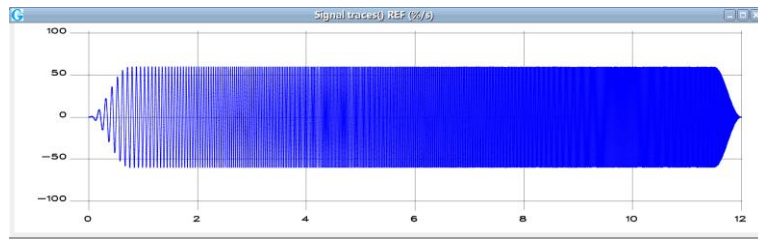
Таблица 2.2. Параметры 2D-съёмки при использовании вибрационных источников.

2.4. Свип-сигналы

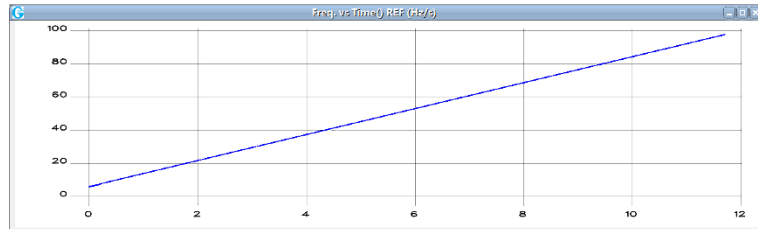
Линейный свип-сигнал (ЛЧМ-сигнал)

Для проведения вибрационных работ использовался линейный свип-сигнал с частотным диапазоном от 6 до 100 Гц. Частота свип-сигнала изменялась линейно, обеспечивая равномерное распределение энергии по всему диапазону. Длительность свип-сигнала составляла 12 секунд, что способствовало высокой энергии возбуждения и формированию надежного сигнала для последующей обработки.

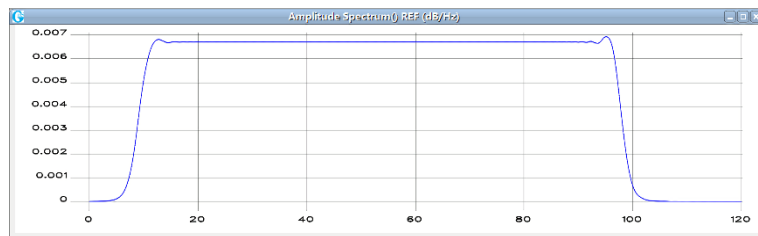
Для предотвращения резких амплитудных скачков на начальных и конечных участках сигнала были применены плавные переходы (конусы). Длительность начального конуса составляла 0,75 секунды, а конечного – 0,5 секунды. Схематические изображения линейного свип-сигнала представлены на рис. 2.3.



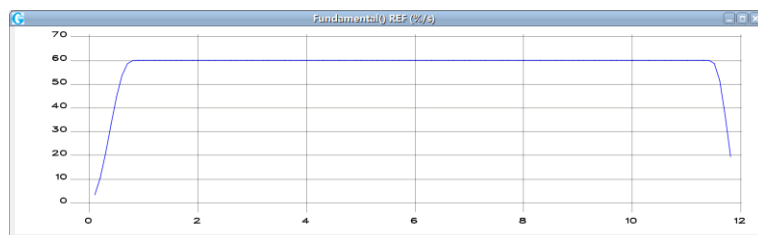
а



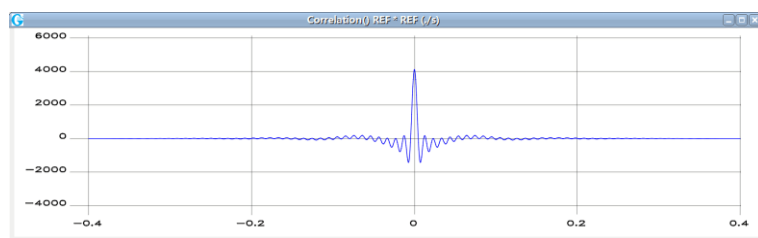
б



в



г



д

Рисунок 2.3. (а) Линейный свип-сигнал, (б) мгновенная частота линейного свип-сигнала, (в) спектр линейного свип-сигнала, (г) мгновенная амплитуда линейного свип-сигнала, (д) автокорреляционная функция линейного свип-сигнала.

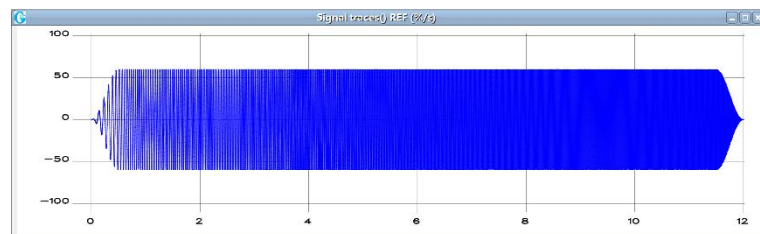
Адаптивный свип-сигнал

Диапазон частот адаптивного свип-сигнала составляет от 8 до 96 Гц. Для достижения оптимального качества свип-сигнала использовался параметр регуляризации, равный 15%.

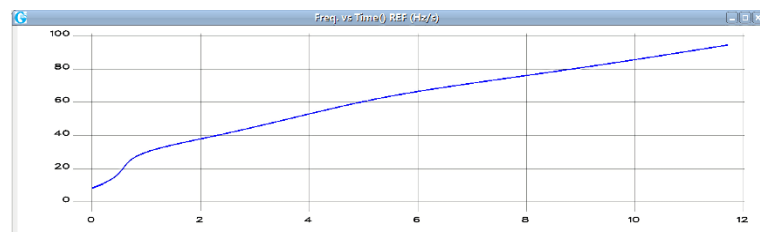
Длительность свип-сигнала составляет 12 секунд, что обеспечивало получение высокоэнергетического отклика от среды и качественную запись. Для сглаживания начального и конечного участков свип-сигнала были использованы конусы длительностью 0,5 секунды с каждого конца, что минимизировало вероятность появления артефактов, связанных с внезапными изменениями амплитуды.

Особое внимание уделялось применению адаптивного свип-сигнала, который обеспечивал дополнительную точность за счет динамической настройки параметров. Количество накоплений при применении адаптивного свип-сигнала составляло 1+4. При первом накоплении на каждом ПВ возбуждается линейный свип-сигнал, производится регистрация отклика среды на этот свип-сигнал, виброграмма передается в программу VibroEqualizer для анализа и расчета коэффициентов адаптивного свип-сигнала. Рассчитанные коэффициенты передаются в шифратор GDS-2 станции для расчета нового адаптивного свип-сигнала, который затем передается в дешифратор (Decoder) вибрационных источников по радиоканалу для возбуждения последующих 4 накоплений на данном ПВ.

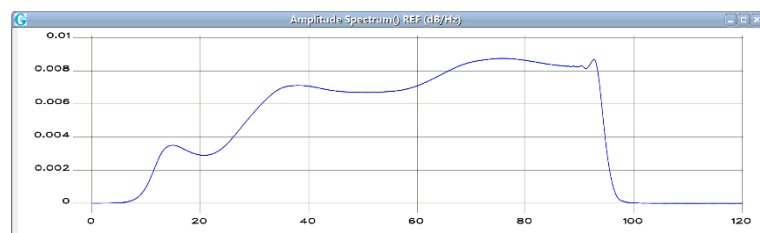
Методология была разработана с учетом новейших подходов к адаптации вибрационных свип-сигналов и опиралась на работы Жукова и соавторов, а схематические изображения данного свип-сигнала представлены на рис. 2.4. Такой подход позволил значительно повысить разрешающую способность сейсмических данных, получаемых при вибрационных исследованиях (Жуков и др., 2021; Жуков и др., 2011).



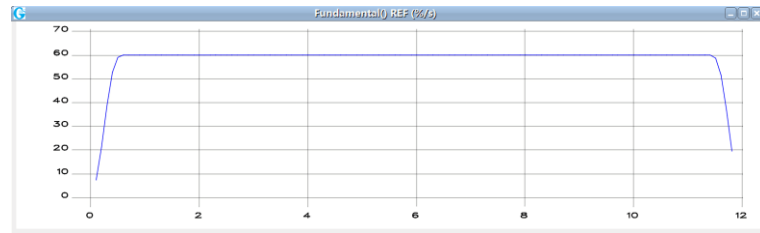
а



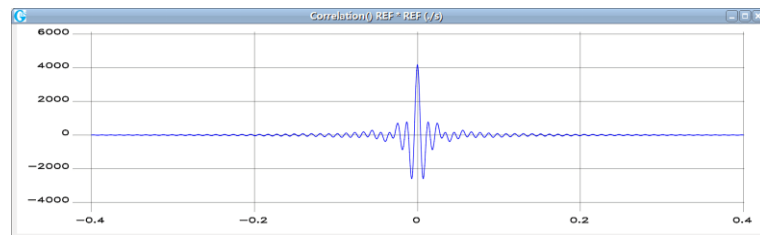
б



В



Г



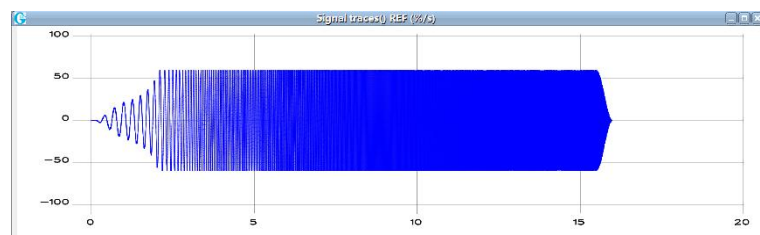
Д

Рисунок 2.4. (а) Адаптивный свип-сигнал, (б) мгновенная частота адаптивного свип-сигнала, (в) спектр адаптивного свип-сигнала, (г) мгновенная амплитуда адаптивного свип-сигнала, (д) автокорреляционная функция адаптивного свип-сигнала.

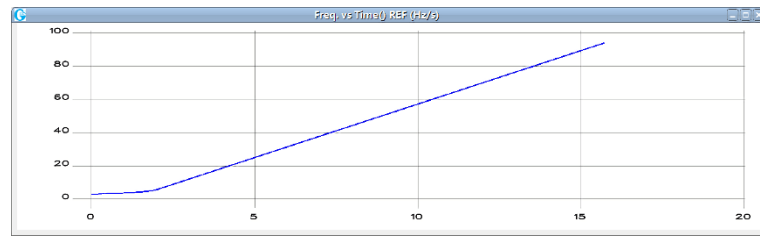
Низкочастотный свип-сигнал (Low dwell)

На рис. 2.5 показан низкочастотный свип-сигнал, частотный диапазон которого составляет 3–6–96 Гц. Этот диапазон охватывает низкочастотные компоненты, обеспечивая достаточную энергию низкочастотной части. Длительность свип-сигнала составляет 16 секунд. Для минимизации переходных эффектов в начале и конце свип-сигнала использовались конусы с длительностью 1,0 секунды и 0,5 секунды соответственно.

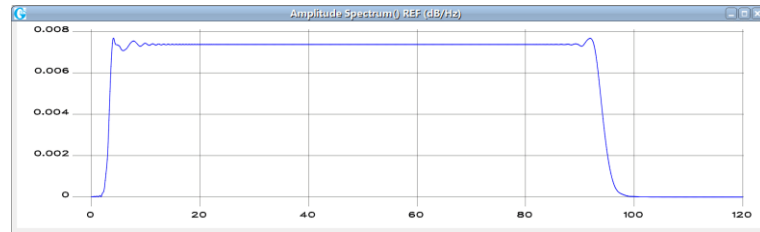
Особенность низкочастотного свип-сигнала заключается в наличии переходной зоны в его начальной низкочастотной части. В этой области частота изменяется нелинейно, и амплитуда свип-сигнала постепенно увеличивается, при этом продолжительность переходного процесса относительно велика. Такой подход позволил увеличить энергию низкочастотной компоненты, что существенно повысило глубину исследования. Подобное решение оказалось особенно эффективным при изучении глубокозалегающих горизонтов, что имеет ключевое значение в условиях сложного геологического строения (Bagaini, 2008).



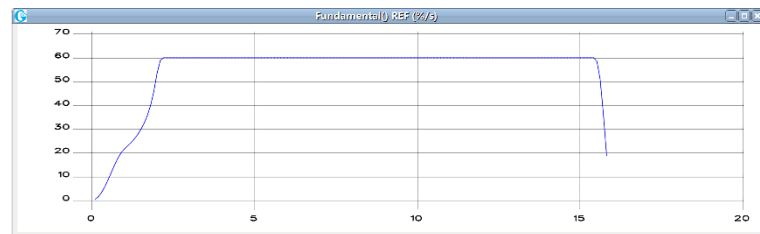
а



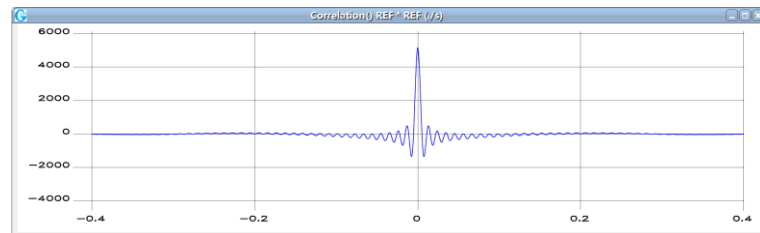
б



в



г



д

Рисунок 2.5. (а) Низкочастотный (нч) свип-сигнал, (б) мгновенная частота нч-сигнала, (в) спектр нч-сигнала, (г) мгновенная амплитуда нч-сигнала, (д) автокорреляционная функция нч-сигнала.

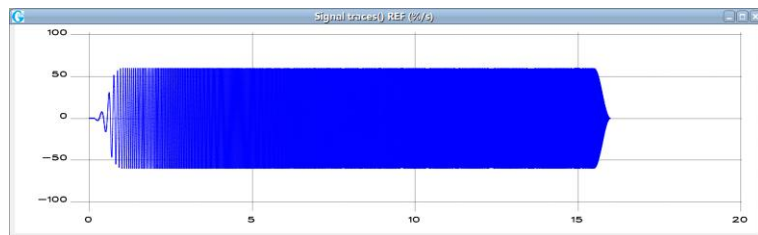
Широкополосный свип-сигнал

На рис. 2.6 представлен широкополосный свип-сигнал, его частотный диапазон составляет 3–96 Гц, что позволяет охватить широкий спектр частот от низких до высоких. Длительность свип-сигнала составляет 16 секунд. Для минимизации переходных эффектов применяются конусы в начале и конце свип-сигнала длительностью 1,0 секунды и 0,5 секунды соответственно (Кострыгин, 2002).

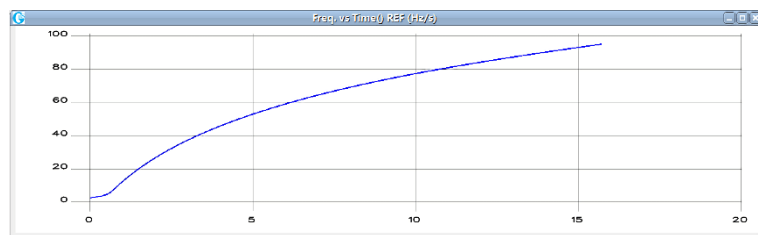
По сравнению с другими типами свип-сигналов, в начале данного свип-сигнала присутствует низкочастотная область, где частота изменяется достаточно быстро, но при этом амплитуда остается постоянной. В широкополосном свип-сигнале частота изменяется нелинейно,

при этом скорость изменения частоты постепенно увеличивается. Такой подход позволяет повысить энергию низкочастотной составляющей сигнала, что, в свою очередь, улучшает глубину исследования и повышает разрешающую способность сейсмических данных.

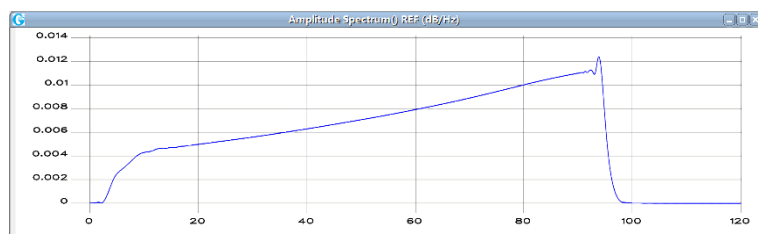
Уровень нелинейности свип-сигнала составлял всего 0,1 дБ/Гц. Низкий уровень искажений сделал свип-сигнал особенно подходящим для высокоточных геофизических исследований. Применение данного типа свип-сигнала способствовало повышению качества записей и обеспечило более точные данные о строении изучаемых объектов, особенно при работе с подсолевыми отложениями.



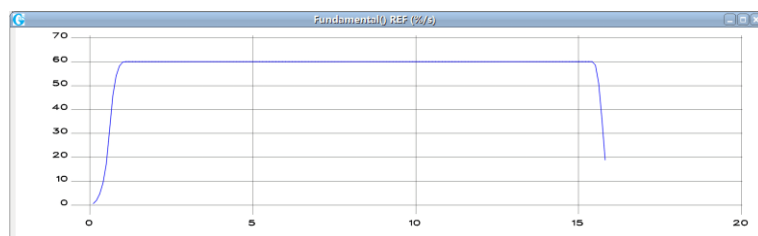
а



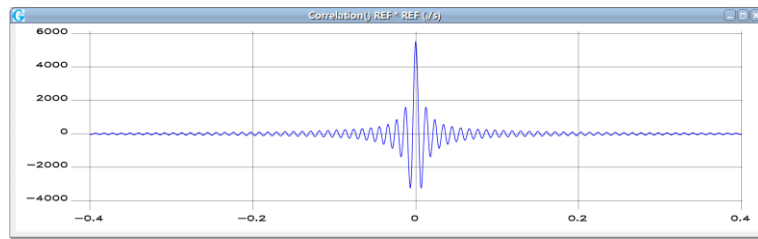
б



в



г



Д

Рисунок 2.6. (а) Широкополосный свип-сигнал, (б) мгновенная частота широкополосного свип-сигнала, (в) спектр широкополосного свип-сигнала, (г) мгновенная амплитуда широкополосного свип-сигнала, (д) автокорреляционная функция широкополосного свип-сигнала.

2.5. Обработка и анализ данных

Для обработки сейсмических данных был использован единый граф обработки (Таблица 2.3). Этот подход обеспечил стандартизацию этапов обработки и сопоставимость полученных результатов. После обработки были получены временные разрезы после временной миграции до суммирования, соответствующие каждому типу свип-сигнала. Это позволило исключить влияние внешних факторов на качество данных и создать объективную основу для их сравнительного анализа. Для оценки качества данных был проведен детальный сравнительный анализ, включает следующие аспекты: амплитудные спектры, временные разрезы, фильтрация по октавам, отношение сигнал/шум и разрешающая способность сейсмических данных (Yilmaz, 2001).

№	Задания	Процедуры
1	Ввод данных и присвоение геометрии	Описание геометрии наблюдений
		Контроль качества присвоения геометрии
2	Кинематическая обработка	Расчет априорных статических поправок по рефрагированным волнам
		Коррекция кинематических и остаточных статических поправок
3	Предварительная обработка	Регулировка амплитуд за сферическое расхождение
		Ввод априорных и остаточных статических поправок
4	Шумоподавление до деконволюции	Подавление регулярных и нерегулярных помех

5	Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд	Поверхностно-согласованная коррекция амплитуд
6	Деконволюция	Нуль-фазовая деконволюция (минимально-фазовая для взрывных данных)
7	Шумоподавление после деконволюции	Подавление регулярных и нерегулярных помех
8	Временная миграция до суммирования	Временная миграция Кирхгоффа до суммирования
9	Кинематическая обработка	Коррекция кинематических поправок
10	Поверхностно-несогласованная коррекция статических поправок (трим-статика	Поверхностно-несогласованная коррекция статических поправок на основе корреляции с внешней моделью
11	Регулировка амплитуд	Автоматическая регулировка амплитуд
12	Суммирование / Обработка после суммирования	- / FX-Decon

Таблица 2.3. Граф обработки взрывных и вибрационных данных

2.5.1. Амплитудные спектры

Анализ амплитудных спектров позволил выявить распределение энергии в частотной области для каждого типа свип-сигнала. Это позволило оценить, насколько эффективно различные сигналы передают низкочастотные и высокочастотные компоненты, что критично для визуализации глубоких горизонтов и мелких деталей геологических структур.

На рис. 2.7 показаны амплитудные спектры различных временных разрезов, полученных с использованием вибрационных и взрывных источников. Детальное сравнение спектров показывает значительные отличия в ширине и стабильности частотных характеристик между этими типами свип-сигналов.

Во всех случаях спектры, полученные с использованием вибрационных свип-сигналов, характеризуются большей шириной и стабильностью по сравнению со спектрами, взрывных данных. Это свидетельствует о более равномерной передаче энергии по всему частотному диапазону.

Взрывной источник

Спектр импульсного сигнала, отличается узкой полосой частот, что приводит к существенному ослаблению как низкочастотных, так и высокочастотных компонентов. Низкочастотная энергия начинает заметно увеличиваться только при частотах выше 15 Гц, что ограничивает эффективность передачи глубинной информации. При этом высокочастотная энергия быстро затухает при частотах выше 60 Гц, что существенно снижает разрешающую способность в верхних горизонтах. Основная частота импульсного сигнала составляет около 30 Гц, что является недостаточным для детальной визуализации тонких слоев и сложных границ. Подобные спектральные ограничения приводят к снижению качества временных разрезов, изображение глубоко залегающих геологических объектов становится размытым, а тонкие слои в верхней части разреза остаются неразличимыми.

Линейный свип-сигнал

Несмотря на то, что спектр линейного свип-сигнала значительно шире, чем спектр импульсного сигнала, в нем отмечается существенный дефицит низкочастотных составляющих, особенно в диапазоне ниже 15 Гц. Это ограничение значительно затрудняет визуализацию глубоко залегающих геологических объектов, снижая информативность и детализированность временных разрезов.

Адаптивный свип-сигнал.

Спектр адаптивного свип-сигнала совпадает со спектром импульсного сигнала в низкочастотной области, что подтверждает его эффективность в передаче низкочастотных компонентов. Однако в среднем и высокочастотном диапазонах адаптивный свип-сигнал обладает значительным преимуществом, его спектр шире и стабильнее. Благодаря этому адаптивный свип-сигнал оказывается более эффективным для задач, требующих высокого разрешения и точного воспроизведения мелких геологических деталей.

Низкочастотный свип-сигнал.

Низкочастотный свип-сигнал характеризуется расширением спектра в сторону низких частот, что особенно важно для исследования глубинных геологических горизонтов. При этом в средних и высокочастотных диапазонах его спектр практически совпадает со спектром линейного свип-сигнала. Такое сочетание характеристик делает низкочастотный свип-сигнал эффективным для комплексных исследований, требующих баланса между глубиной проникновения и разрешающей способностью.

Широкополосный свип-сигнал.

Широкополосный свип-сигнал обладает максимальной шириной спектра, охватывая как низкие, так и высокие частоты. Благодаря такому распределению энергии он является универсальным инструментом для сейсмических исследований, обеспечивая одновременно изучение глубинных структур и детальную визуализацию верхних слоев. Его преимущества

наиболее заметны в условиях сложного геологического строения, где критично максимально полно использовать весь доступный частотный диапазон.

Спектральные характеристики вибрационных свип-сигналов подтверждают их высокую эффективность в сейсмических исследованиях. Адаптивные, низкочастотные и широкополосные свип-сигналы демонстрируют повышенную стабильность и более широкий спектр по сравнению с традиционными взрывными сигналами. Благодаря этим характеристикам они являются предпочтительным выбором для задач, требующих как глубинной разведки, так и высокоточного картирования сложных геологических структур.

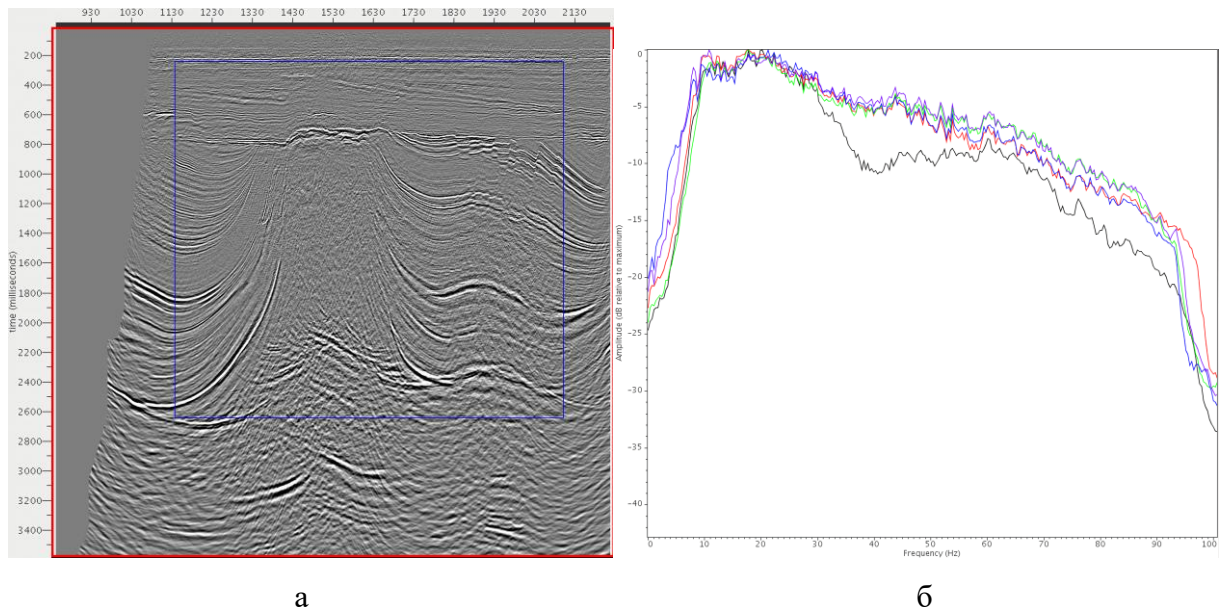


Рисунок 2.7. (а) Окно для расчета спектра, (б) спектры различных временных разрезов (чёрный – взрывного источника, красный – Линейного свип-сигнала, зелёный – Адаптивного свип-сигнала, синий – Низкочастотного свип-сигнала, фиолетовый – Широкополосного свип-сигнала).

2.5.2. Временные разрезы после временной миграции до суммирования

На рис. 2.8 и 2.9 представлены временные разрезы, полученные с использованием различных типов свип-сигналов. Визуальный анализ изображений подтверждает существенные преимущества низкочастотного и широкополосного сигналов для сейсмических исследований.

Применение низкочастотного свип-сигнала способствует более четкому отображению глубинных геологических объектов за счет повышенной энергии в низкочастотном диапазоне, что особенно важно при исследовании сложных структур, таких как соляные купола или глубоко залегающие горизонты. В то же время использование широкополосного свип-сигнала не только сохраняет глубину исследований, но и значительно улучшает динамическую выразительность отражающих горизонтов. Это связано с расширением частотного спектра в обе стороны – как в

низкочастотную, так и в высокочастотную область, что позволяет детализировать мелкие слои и точнее определять границы геологических объектов.

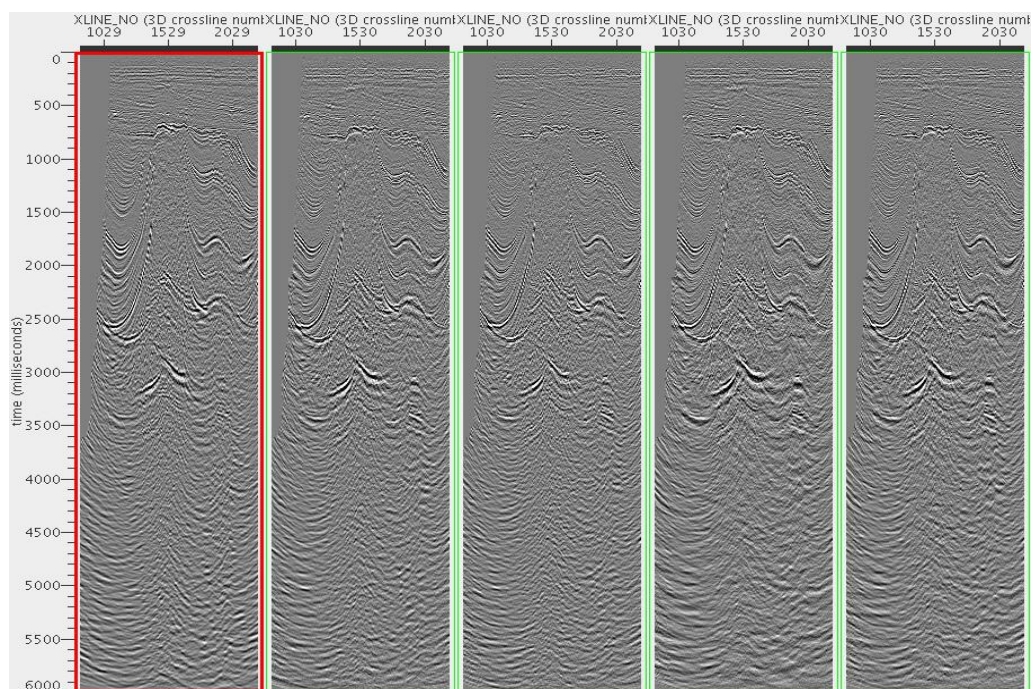


Рисунок 2.8. Временные разрезы вдоль тестового профиля после временной миграции (0–6000 мс). Слева направо представлены разрезы, полученные с использованием взрывного источника, Линейного свип-сигнала, Адаптивного свип-сигнала, Низкочастотного свип-сигнала и Широкополосного свип-сигнала.

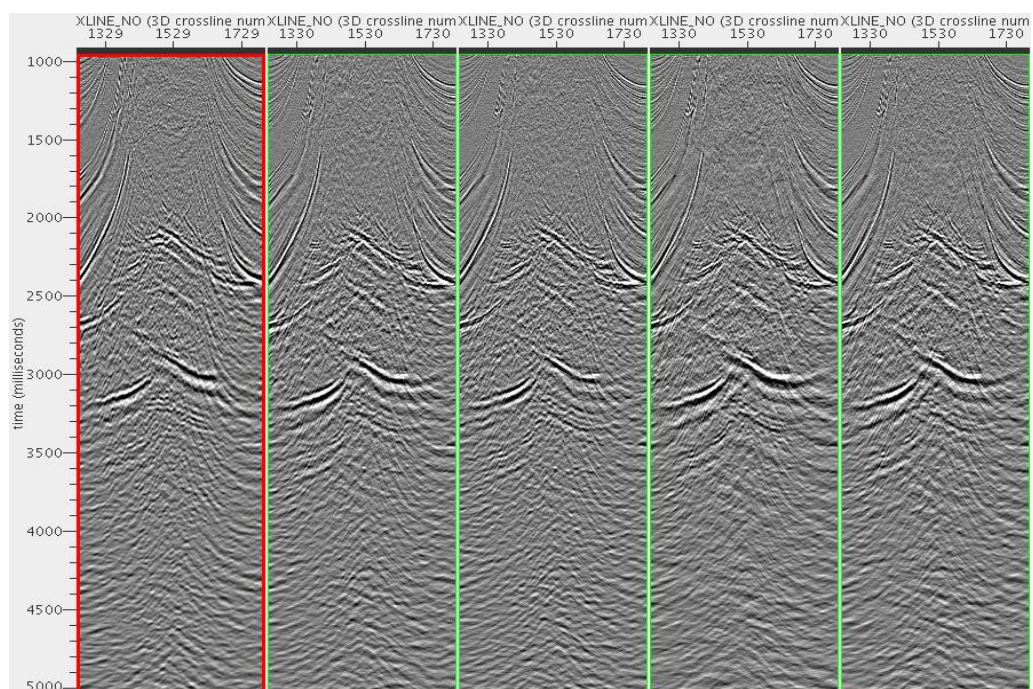


Рисунок 2.9. Временные разрезы вдоль тестового профиля после временной миграции (1000–5000 мс). Слева направо представлены разрезы, полученные с использованием взрывного источника, Линейного свип-сигнала, Адаптивного свип-сигнала, Низкочастотного свип-сигнала

и Широкополосного свип-сигнала.

2.5.3 Фильтрация по октавам

На рис. 2.10 представлены результаты полосовой фильтрации по октавам для каждого из наборов обработанных данных. Для анализа каждый набор был разделён на пять диапазонов частот.

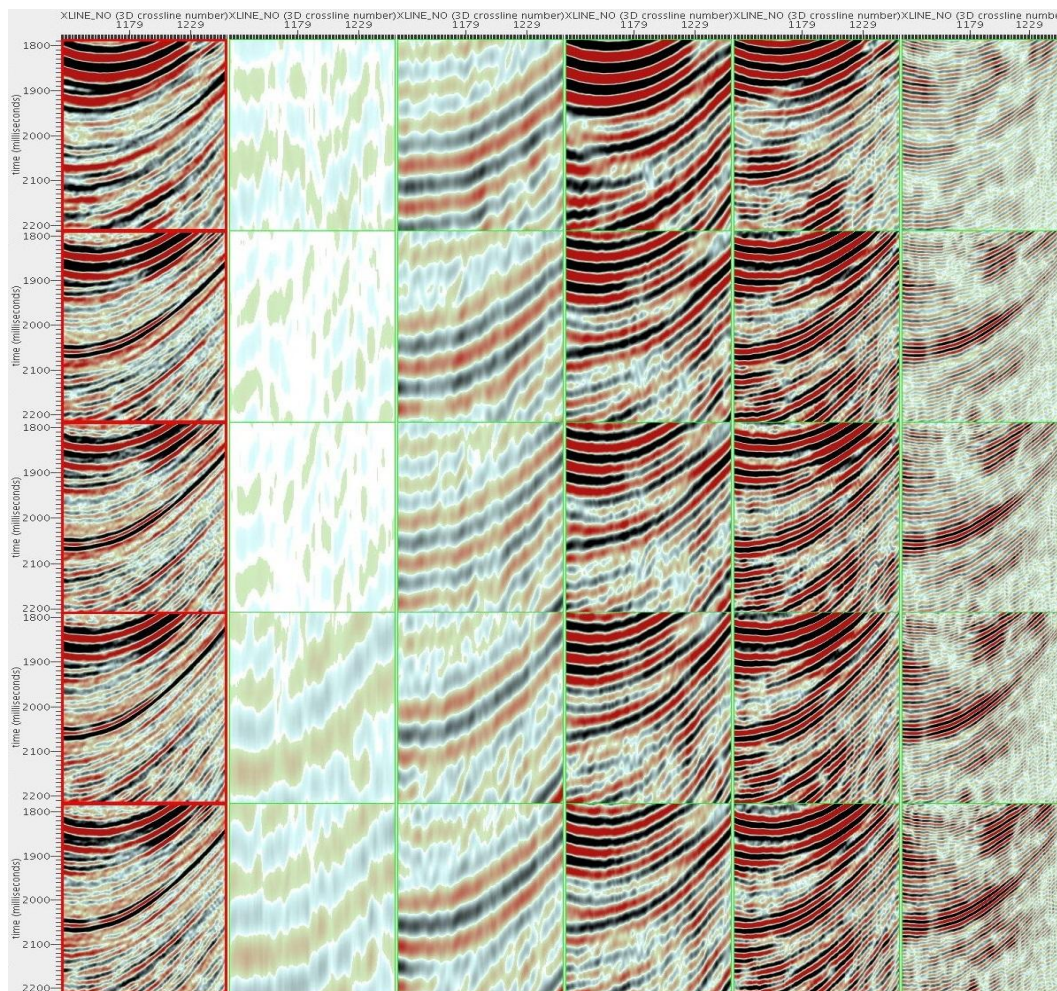


Рисунок 2.10. Временные разрезы (1800–2200 мс, номер CDP 1129-1259) после фильтрации по октавам (узкополосная фильтрация). Слева направо – нефигурованный временной разрез, 3–6

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.

Как следует из анализа, данные, полученные с использованием широкополосного свип-сигнала, демонстрируют заметное расширение амплитудного спектра. Это расширение особенно выражено в низкочастотной области (3–6 Гц), где визуальная разрешающая способность временных разрезов значительно превосходит аналогичные показатели для других типов

сигналов. Особую роль в достижении таких результатов играет Dwell-конус, который использует специальную нелинейную модуляцию частоты и амплитуды. Это решение позволяет обеспечить стабильную и безопасную работу вибрационного источника даже в ультранизкочастотной области, что имеет решающее значение для проведения исследований с высокой глубиной зондирования.

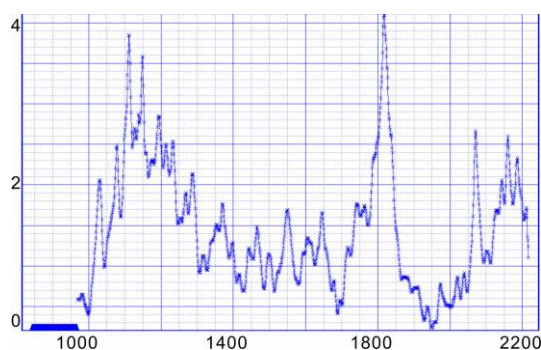
Таким образом, анализ полосовой фильтрации подтверждает эффективность широкополосного свип-сигнала для повышения качества и детальности сейсмических данных, что делает его предпочтительным выбором для дальнейших исследований, требующих высокой информативности и разрешающей способности.

2.5.4. Отношение сигнал/шум

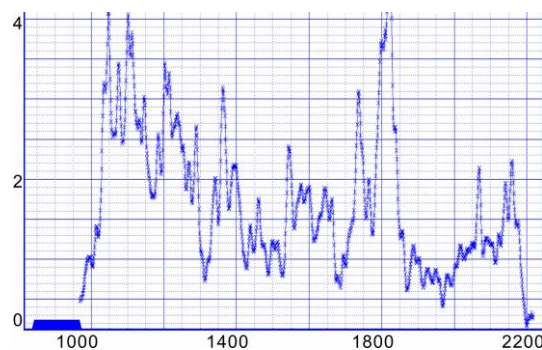
Поскольку целевой пласт расположен на глубине 3900–4000 м, что соответствует временному интервалу 2400–2600 мс на временном разрезе, для оценки отношения сигнал/шум мы выбрали данные именно в этом интервале на каждом сейсмическом разрезе, показаны на рис. 2.11.

Анализ отношения сигнал/шум показал следующие результаты. Данные, полученные с использованием взрывного источника, характеризуются самым низким отношением сигнал/шум в указанном интервале. Наивысшее значение отношения сигнал/шум продемонстрировали данные линейного свип-сигнала, тогда как отношение сигнал/шум широкополосного свип-сигнала оказалось немного ниже, чем у линейного. Однако широкополосный свип-сигнал позволяет расширить эффективный спектральный диапазон сейсмических данных. Отношение сигнал/шум низкочастотного свип-сигнала уступает показателям широкополосного, но все же остается лучше, чем у адаптивного свип-сигнала.

Таким образом, линейный и широкополосный свип-сигналы показали хорошую эффективность в обеспечении высокого отношения сигнал/шум в целевом интервале, что подтверждает их преимущество для задач визуализации глубоких геологических объектов.



а



б

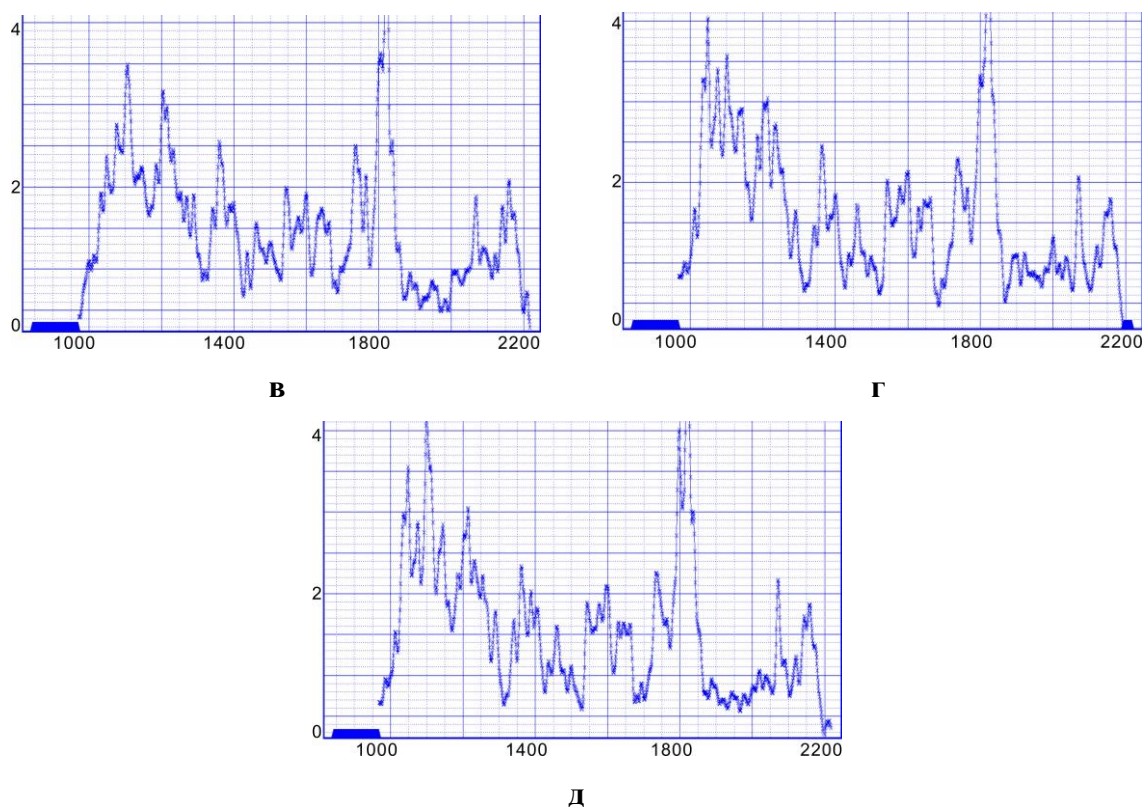


Рисунок 2.11. Отношение сигнал/шум сейсмических данных в интервале 2400–2600 мс. По оси X – номер CDP, по оси Y – отношения сигнал/шум. (а) Взрывного источника, (б) Линейного свип-сигнала, (в) Адаптивного свип-сигнала, (г) Низкочастотного свип-сигнала, (д) Широкополосного свип-сигнала.

2.5.5. Разрешающая способность.

Анализ амплитудных спектров, рассчитанных с учетом интервала выше -10 дБ, показал, что различные типы сигналов имеют следующие центральные частоты: для взрывного источника – 21,65 Гц, для линейного свип-сигнала – 29,7 Гц, для адаптивного свип-сигнала – 32,35 Гц, для низкочастотного свип-сигнала – 33,75 Гц, а для широкополосного свип-сигнала – 34,75 Гц. Высшая центральная частота, соответствующая данным широкополосного свип-сигнала, теоретически предполагает наивысшее вертикальное разрешение.

Для оценки вертикального разрешения использованы данные в интервале 2400–2600 мс временных разрезов. Результаты расчета показывают следующие значения вертикального разрешения:

- Для взрывного источника – 25 м.
- Для линейного свип-сигнала – 20 м.
- Для адаптивного свип-сигнала – 19,5 м.
- Для низкочастотного свип-сигнала – 19 м.
- Для широкополосного свип-сигнала – 18 м.

Таким образом, данные, полученные с использованием вибрационных свип-сигналов, демонстрируют более высокое разрешение по сравнению с данными взрывного источника. Лучшее разрешение достигается при использовании широкополосного свип-сигнала.

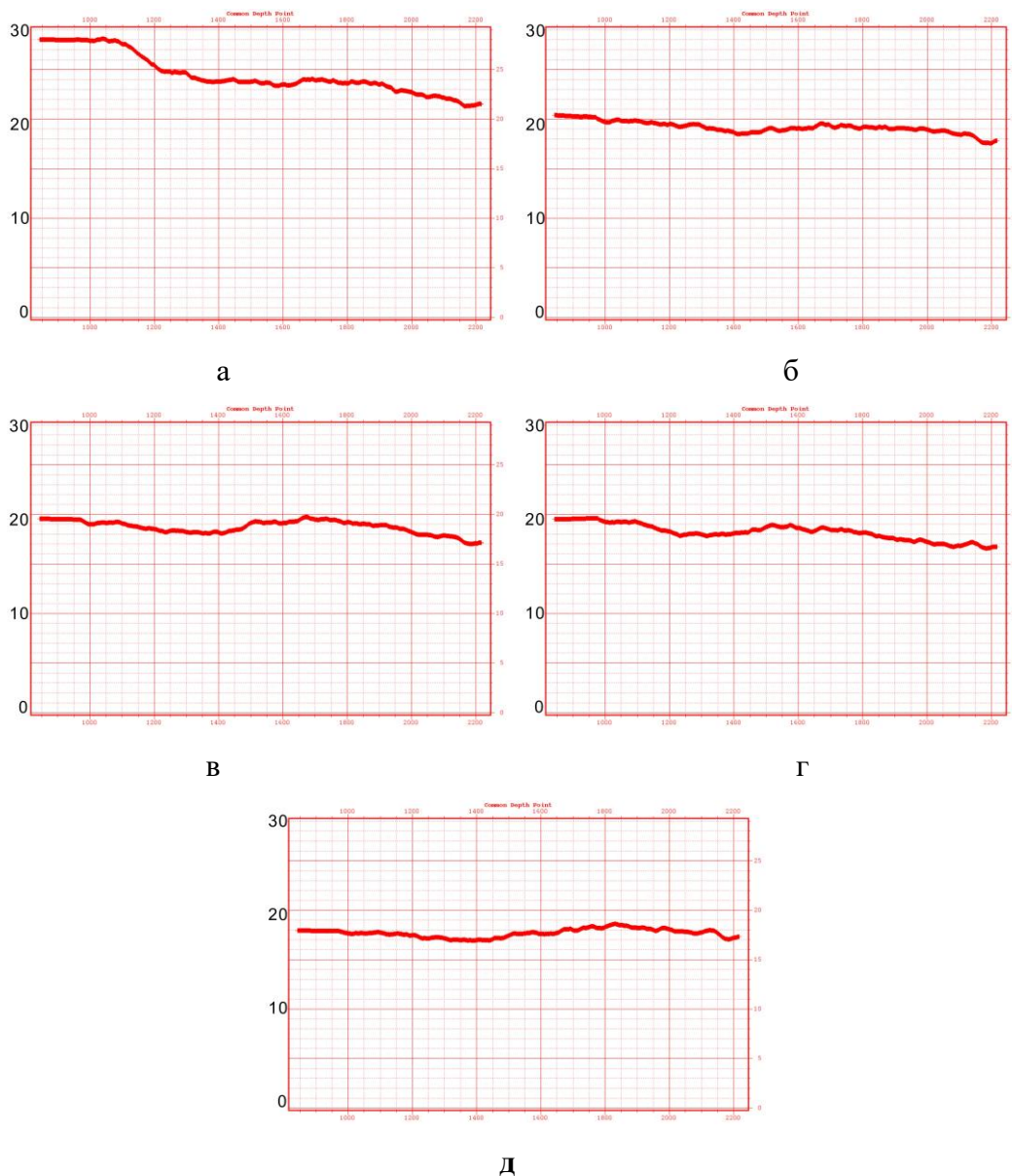


Рисунок 2.12. Разрешающая способность сейсмических данных в интервале 2400–2600 мс. По оси X – номер CDP, по оси Y – разрешающая способность. (а) Взрывного источника, (б) Линейного свип-сигнала, (в) Адаптивного свип-сигнала, (г) Низкочастотного свип-сигнала, (д) Широкополосного свип-сигнала.

2.6. Результат интерпретации

На основе временного разреза, полученного с использованием широкополосного свип-сигнала, была построена геологическая модель изучаемого пространства, которая представлена на рис. 2.13. Визуализация геологических слоев, основанная на высокочастотном разрешении,

обеспеченном широкополосным свип-сигналом, позволяет детально выявить структурные особенности подземных горизонтов.

Модель дает четкое представление о глубине залегания различных геологических объектов, а также о возможных разломах и аномалиях в структуре. Такой подход обеспечивает точное отображение мелких деталей, таких как тонкие слои или границы между различными типами пород, что делает результаты интерпретации полезными для дальнейших исследований и практических применений в геофизике, особенно при исследовании сложных геологических структур, таких как соляные купола и другие глубокие горизонты.

Результаты, полученные с использованием широкополосного свип-сигнала, также подтверждают высокое качество изображения, улучшенную разрешающую способность и значительное увеличение детализации геологических объектов по сравнению с традиционными методами.

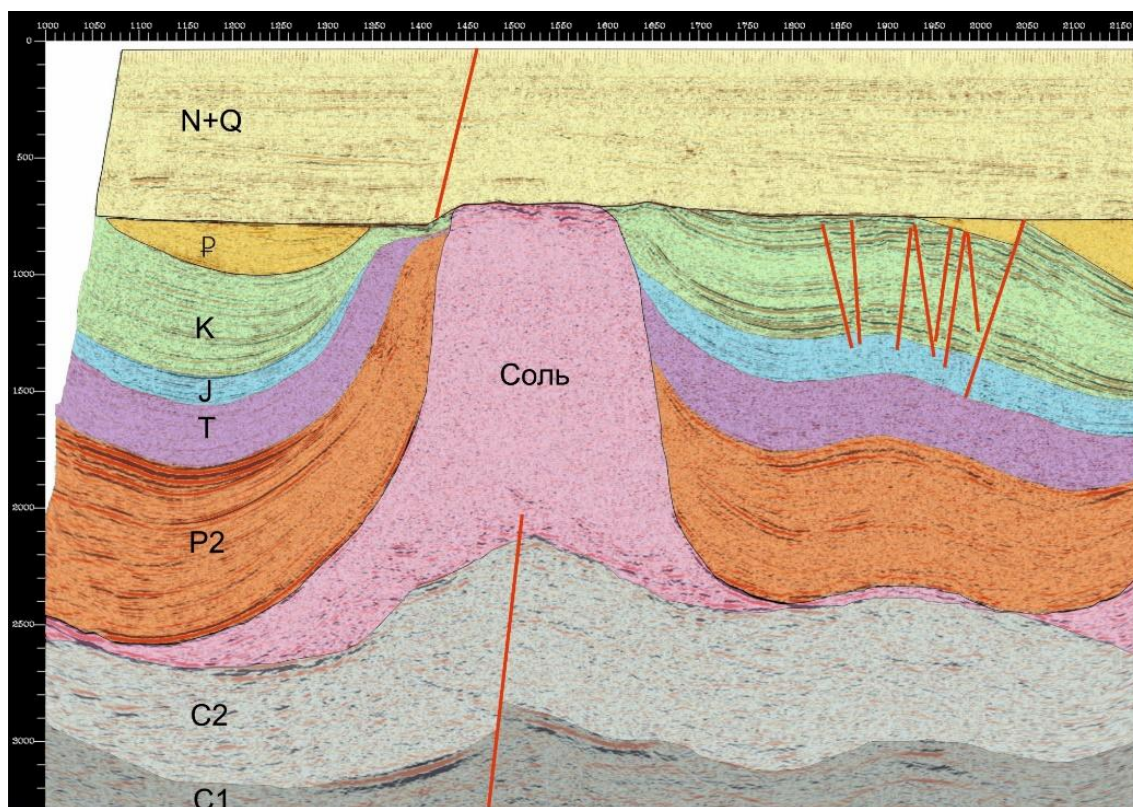


Рисунок 2.13. Результат интерпретации на основе широкополосных данных.

2.7. Выводы

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы: вибрационное возбуждение по качеству полученных данных не уступает взрывному источнику. Данные, полученные с использованием широкополосного свип-сигнала, обладают рядом

значительных преимуществ: расширение спектра возбуждаемых колебаний как в сторону низких, так и в сторону высоких частот, увеличение глубины исследования, улучшение разрешающей способности, более четкое и выразительное отображение отражающих горизонтов, повышение отношения сигнал/шум, более точное выявление структурных нарушений. Наличие низкочастотных составляющих в спектре широкополосных данных повышает достоверность псевдоакустических преобразований сейсмических данных. Для дальнейших исследований наиболее оптимальным является широкополосный свип-сигнал.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СВИП-СИГНАЛОВ²

В данной главе проведено исследование псевдослучайных свип-сигналов, а также изучены их история развития и классификация. Основное внимание было уделено пяти типам псевдослучайных свип-сигналов: свёртке двоичной последовательности, фильтрации двоичной последовательности, импульсной развертке, перестановке развертки и генерации недвоичных случайных чисел. 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 пять типов свип-сигналов: линейный, случайный и три различных варианта псевдослучайных свип-сигналов с различными схемами кодирования. Такие сигналы обладают высокой перспективностью для повышения производительности при проведении крупномасштабных 3D-сейсмических съемок, поскольку позволяют увеличить эффективность регистрации волнового поля без снижения качества данных. Результаты численного моделирования подтвердили, что предложенные псевдослучайные свип-сигналы обеспечивают как увеличение производительности сейсмических исследований, так и улучшение качества получаемых изображений, в частности, за счет расширения спектрального диапазона и повышения устойчивости к шумам.

3.1. История разработки и применения псевдослучайных свип-сигналов в вибрационной сейсморазведке

Геофизические методы разведки составляют основу исследований строения Земли и поиска полезных ископаемых. Значительное место среди них занимает вибрационная сейсморазведка, ключевая особенность которой заключается в управляемом возбуждении упругих колебаний, что позволяет гибко изменять параметры источника в зависимости от задач исследования (Шнеерсон, 1998). По данным Кострыгина (2014), до 75% сейсмических записей в мире производится с использованием вибрационных источников. Популярность метода

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

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)).

объясняется его ключевыми преимуществами, такими как возможность управления спектральным составом волн, применение корреляционных методов для выделения сигналов на фоне шума, а также проведение работ в условиях высокой урбанизации, где использование взрывных источников ограничено (Шнеерсон и др., 1990). Развитие технологии вибрационных источников привело к появлению различных типов свип-сигналов, включая линейные, нелинейные, случайные и псевдослучайные. Однако стандартные для отрасли линейные свип-сигналы не учитывают сложные эффекты распространения волн в геологической среде, такие как частотно-зависимое поглощение и фазовая дисперсия. Для решения этой проблемы был предложен метод полностью управляемых свип-сигналов, основанный на использовании обратного фильтра геологической среды (Korotkov et al., 2022). Такой подход позволяет учитывать физические свойства среды и обеспечивает более точную корреляцию сигналов. При этом задача повышения производительности вибросейсмических исследований остаётся актуальной. Одним из перспективных решений является метод независимого одновременного возбуждения (ISS), предложенный Howe и соавторы (2008). Его основная идея заключается в применении некоррелированных случайных или псевдослучайных свип-сигналов, что позволяет минимизировать интерференцию за счёт снижения взаимного влияния одновременно работающих источников.

Псевдослучайные свип-сигналы стали важным элементом современной сейсморазведки благодаря их преимуществам в повышении качества данных и увеличении производительности по сравнению с традиционными методами. Первые идеи по их созданию возникли в 1966 году, когда Crook и Rieble независимо представили способы генерации таких сигналов в патентах (Crook et al., 1966; Rieble, 1966). Дальнейшие исследования в этом направлении активно развивались в 1970-х годах. В 1976 году Goupillaud предложил методику формирования псевдослучайных сигналов на основе модификации линейных свип-сигналов (Goupillaud, 1976). Позже, в 1979 году, Cunningham продемонстрировал, что использование псевдослучайных кодов снижает уровень энергии боковых лепестков, что выгодно отличает их от линейных свип-сигналов (Cunningham, 1979). Кострыгин (1991) исследовал двухполярные кодоимпульсные варианты псевдослучайных сигналов. В 1990-х годах Burger и Baliguet разработали новые подходы к управлению вибраторами, которые позволили применять псевдослучайные сигналы в условиях плотной городской застройки. Эти методы обеспечили снижение уровня шумов и повышение качества записей (Burger and Baliguet, 1992). На рубеже 2000-х годов исследования Iranpour открыли новые горизонты: применение алгоритмов имитации отжига позволило оптимизировать параметры псевдослучайных сигналов, улучшив их амплитудно-частотные характеристики и корреляционные свойства (Iranpour et al., 2015). Dean в своих экспериментах изучал возможности вибрационных источников для эффективной передачи таких сигналов,

несмотря на их сложность в реализации. Его работы доказали, что при правильной настройке псевдослучайные свип-сигналы обеспечивают высокое качество данных даже в сложных условиях (Dean, 2012). Ян Сюань предложил метод свертки тройной последовательности в 2011 году (Yang Xuan et al., 2011). Наиболее современные исследования в этой области принадлежат Wang, который в 2024 году разработал несколько новых типов свип-сигналов, основанных на сочетании псевдослучайных последовательностей с синусоидальными и линейными свип-сигналами, что значительно расширило возможности их применения (Wang et al., 2024; Ван и др., 2025). Эти достижения подчеркивают потенциал псевдослучайных свип-сигналов как в теоретическом, так и в прикладном аспектах сейморазведки.

Псевдослучайные свип-сигналы предлагают значительные преимущества по сравнению с линейными свип-сигналами, традиционно применяемыми в сейсмических исследованиях. Среди ключевых преимуществ – узкие основные лепестки и уменьшенные боковые лепестки автокорреляционных функций. Это обеспечивает повышенное разрешение в получаемых данных (Dean, 2012). Кроме того, стабильность псевдослучайных свип-сигналов к шуму делает их подходящим выбором для современных задач, особенно в условиях использования высокопроизводительных технологий, таких как метод независимого одновременного возбуждения (ISS). С развитием ISS возросла проблема взаимных помех, вызванных одновременной работой нескольких групп вибраторов. Псевдослучайные свип-сигналы способны минимизировать такие помехи уже на этапе записи, снижая необходимость их последующей обработки (Nasreddin et al., 2012). Более того, распределение энергии этих сигналов во времени снижает пиковую скорость частиц. Это особенно важно при проведении сейсмических исследований в населенных пунктах, где снижение вибрации грунта способствует минимизации риска повреждения конструкций. Scholtz отмечает, что оптимизированные псевдослучайные свип-сигналы снижают пиковую скорость частиц более чем в два раза по сравнению с линейными аналогами (Scholtz, 2013). Методы генерации псевдослучайных свип-сигналов различаются по принципам, что позволяет адаптировать их под конкретные задачи. Dean выделяет пять подходов: свёртка двоичной последовательности, фильтрация двоичной последовательности, импульсная развёртка, перестановка свип-сигнала и использование недвоичных случайных чисел (Dean, 2014; Dean, 2017). Среди них особое внимание заслуживают сигналы, полученные методом свертки двоичной последовательностей. Такие сигналы отличаются низким уровнем боковых лепестков и распределением энергии, близким к линейным свип-сигналам, что делает их универсальным инструментом для сейморазведки (Askeland et al., 2009). Эти преимущества позволяют псевдослучайным свип-сигналам занимать важное место в арсенале современных методов сейсмической съемки, особенно при решении сложных задач в условиях повышенного шума и ограничений по воздействию на окружающую среду.

двоичной последовательности, троичная псевдослучайная последовательность имеет три возможных кодовых значения: -1 , 0 , $+1$. Метод впервые предложил Ян Сюань в 2011 году (Yang Xuan et al., 2011). На рис. 3.2 (a) приведена троичная псевдослучайная последовательность, на рис. 3.2 (b) – соответствующий псевдослучайный свип-сигнал, а на рис. 3.2 (c) – его автокорреляционная функция. По сравнению с двоичной последовательностью той же длины, в процессе возбуждения вибратор остаётся неактивным в течение длительных интервалов, что приводит к значительно меньшей энергетике по сравнению с линейным свип-сигналом. Однако боковые лепестки автокорреляционной функции в этом случае имеют большую амплитуду, чем у двоичной последовательности (Wang Zhongren, 2009).

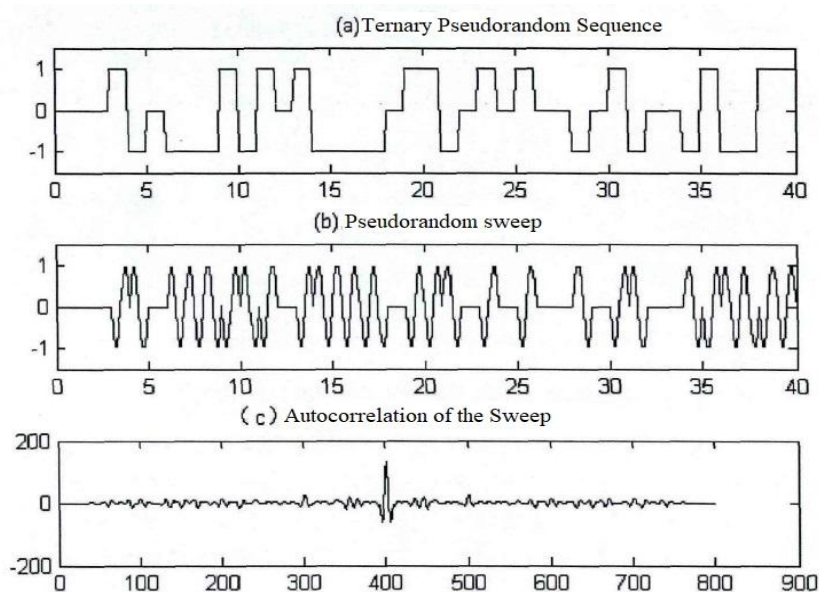


Рисунок 3.2. (a) Троичная псевдослучайная последовательность, (b) Псевдослучайный свип-сигнал, полученный методом свёртки троичной последовательности, (c) Автокорреляционная функция псевдослучайного свип-сигнала (Dean T., 2014).

Фильтрация двоичной последовательности

Фильтрация двоичной последовательности означает выполнение операций фильтрации сгенерированной двоичной последовательности для приведения её к идеальному частотному диапазону. В качестве двоичной последовательности обычно используется М-последовательность. Примеры численного моделирования таких сигналов были показаны Wong в 2014 году (Wong et al., 2014). На рис. 3.3 показан процесс генерации псевдослучайных свип-сигналов из двух независимых М-последовательностей, при этом два сгенерированных псевдослучайных свип-сигнала также имеют некоррелированные характеристики.

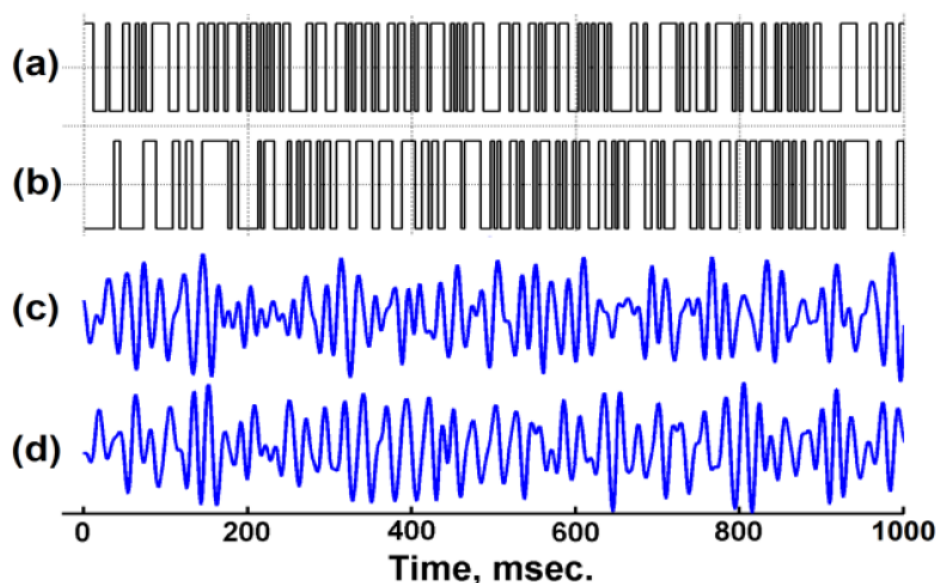


Рисунок 3.3. (a) Первая М-последовательность, (b) вторая М-последовательность, (c) свип-сигнал, полученный после фильтрации первой М-последовательности, (d) свип-сигнал, полученный после фильтрации второй М-последовательности (Wong et al., 2014).

Импульсная развертка

Импульсная развертка формируется серией импульсов, разделённых псевдослучайными временными задержками. В предпочтительной реализации Танера использовались серии импульсов прямоугольной формы с длительностью 4–8 мс (Taner, 1972). На рис. 3.4 приведены примеры свип-сигналов, сгенерированных с использованием прямоугольных и треугольных импульсных сигналов, а также их автокорреляционные функции и спектры мощности. Несмотря на то, что автокорреляционная функция таких сигналов демонстрирует минимальные боковые лепестки и широкий спектр мощности, значительная часть времени во время развертки вибратор остаётся неактивным. В результате энергия таких свип-сигналов составляет лишь около 5% от энергии линейного свип-сигнала (Khasan et al., 2018).

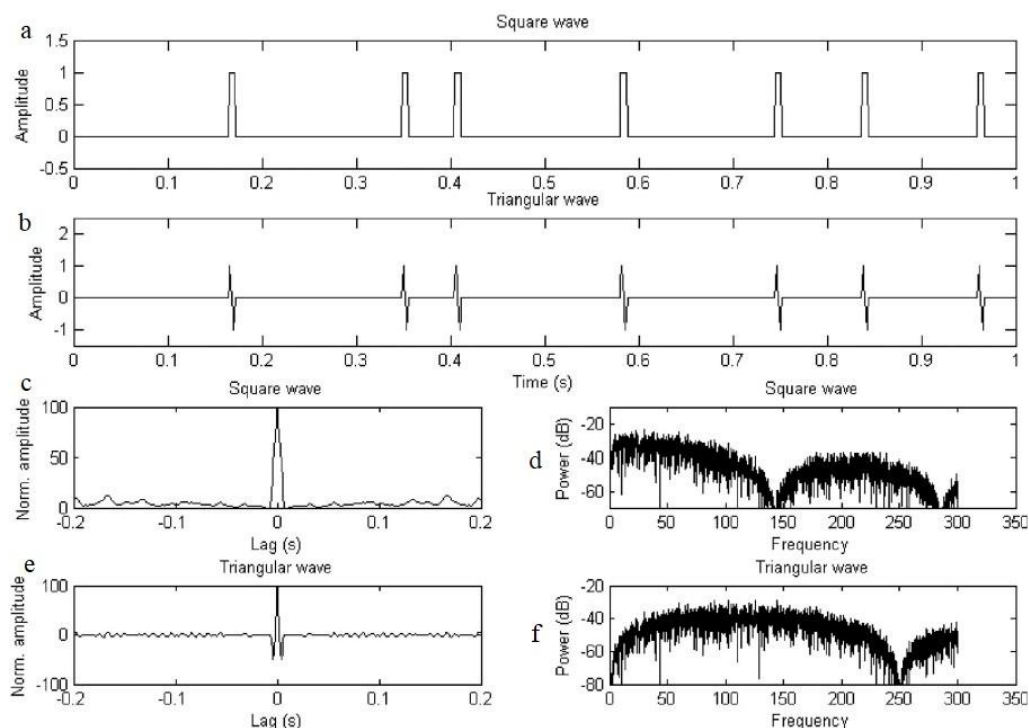


Рисунок 3.4. (а) Псевдослучайный свип-сигнал, сгенерированный из прямоугольных импульсных сигналов, (б) Псевдослучайный свип-сигнал, сгенерированный из треугольных импульсных сигналов, (с) Автокорреляционная функция сигнала (а), (д) Спектр мощности сигнала (а), (е) Автокорреляционная функция сигнала (б), (ф) Спектр мощности сигнала (б) (Dean T., 2014).

Перестановка свип-сигнала

Перестановка свип-сигнала была впервые предложена Goupillaud в 1976 году и основана на случайном переупорядочивании существующих сегментов свип-сигнала. Метод Goupillaud включает сегментацию линейного свип-сигнала, при которой каждый сегмент содержит только положительные или отрицательные амплитуды. Затем сегменты случайным образом переставляются, при этом сохраняется их последовательность по знаку, что приводит к формированию псевдослучайного свип-сигнала (Goupillaud, 1976), как показано на рис. 3.5. Из-за случайного характера свип-сигнала его автокорреляционная функция, полученная этим методом, имеет выраженные боковые лепестки, в отличие от автокорреляционной функции линейного свип-сигнала, где боковые лепестки быстро затухают.

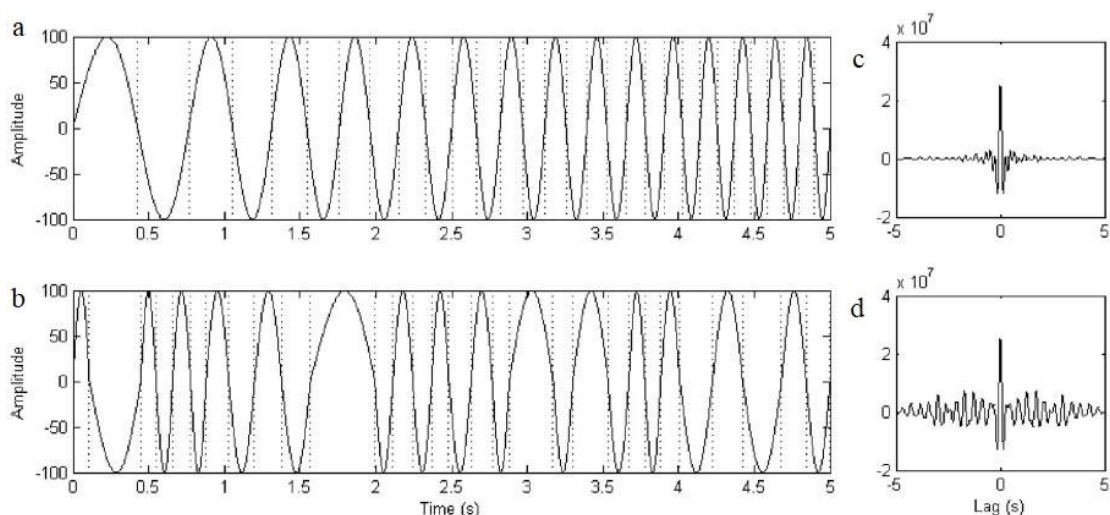


Рисунок 3.5. (а) Линейный свип-сигнал, (б) Псевдослучайный свип-сигнал, полученный методом перестановки свип-сигнала, (с) Автокорреляционная функция сигнала (а), (д) Автокорреляционная функция сигнала (б) (Dean T., 2014).

Недвоичные случайные числа

Метод недвоичных случайных чисел был предложен Muir в 1986 году. Он использует случайную последовательность, адаптирует её к нормальному распределению и фильтрует для ограничения частотного диапазона (Muir, 1984; Muir, 1986). Энергия псевдослучайного свип-сигнала, генерируемого этим методом, составляет всего 16 % энергии линейного свип-сигнала. На рис. 3.6 показаны спектр мощности и распределение амплитуд сгенерированного псевдослучайного свип-сигнала.

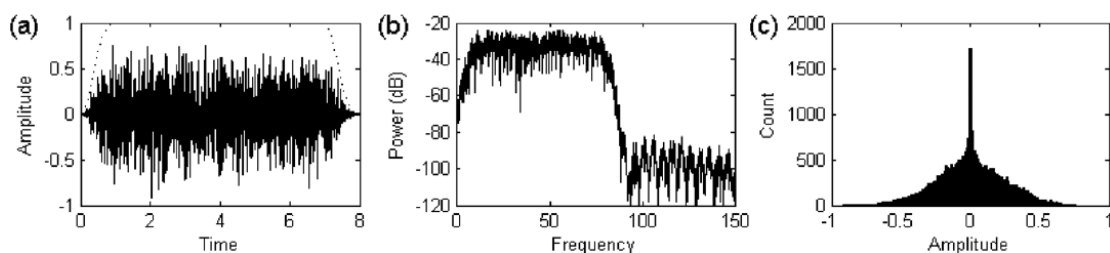


Рисунок 3.6. (а) Псевдослучайный свип-сигнал, (б) Спектр мощности сигнала (а), (с) Распределение амплитуды сигнала (а) (Dean T., 2014).

Теоретические преимущества псевдослучайных свип-сигналов неоднократно подтверждались на практике. Одно из первых значимых полевых исследований было проведено Sallas в 2011 году. В ходе эксперимента использовались специально разработанные псевдослучайные свип-сигналы для 2D-сейсмической съемки. Полученные данные превзошли результаты, достигнутые с использованием технологии High Fidelity Vibratory Seismic (HFVS), продемонстрировав снижение уровня шумов и повышение качества сейсмических изображений

(Sallas et al., 2011). Nasreddin в своих работах изучал применение псевдослучайных свип-сигналов для решения задач независимых одновременных возбуждений. Серия полевых испытаний показала, что эти сигналы эффективно уменьшают уровень шума, при этом сохраняют высокую производительность. Это открытие стало важным этапом в совершенствовании методов высокопроизводительной сейсморазведки (Nasreddin et al., 2012). Исследования Wong и Langton были посвящены использованию М-последовательностей для управления несколькими вибраторами в режиме независимого одновременного возбуждения. Они продемонстрировали, что квази-ортогональные М-последовательности позволяют получать сейсмограммы с минимальными взаимными помехами, при этом качество данных оставалось сопоставимым с тем, которое достигается при использовании линейных свип-сигналов (Wong и Langton, 2014). Thomas сделал значительный вклад в развитие этой технологии, протестировав кодированные последовательности в различных полевых условиях. Его результаты показали, что псевдослучайные свип-сигналы обладают высокой адаптивностью, что делает их эффективным решением для работы в сложных геологических условиях (Thomas et al., 2012). Эти исследования убедительно демонстрируют, что псевдослучайные свип-сигналы не только теоретически, но и на практике превосходят традиционные методы, подтверждая их значимость для современных сейсморазведочных технологий.

Среди недавних достижений в области сейсмической разведки стоит выделить работы Zhukov и Korotkov (2017), которые предложили новый тип случайных свип-сигналов, получивший название Shuffle свип-сигналов. Эти сигналы формируются в режиме реального времени с помощью блока управления вибрационных источников, что делает их привлекательным вариантом для применения в условиях, требующих высокой производительности (Zhukov et al., 2017). Shuffle свип-сигналы обладают концептуальной схожестью с методами перестановки свип-сигналов, однако демонстрируют определенные отличия. Несмотря на более высокий уровень шума в их автокорреляционных функциях, временные разрезы, полученные после обработки, оказываются сопоставимыми по качеству с разрезами, полученными при использовании линейных свип-сигналов. Это подтверждает их потенциал в повышении эффективности сейсмических исследований. Полевые эксперименты Korotkov и его коллег (2023) показали, что использование Shuffle свип-сигналов позволяет значительно повысить продуктивность вибрационных исследований. Эти сигналы оптимизируют процесс сбора данных, предлагая практическое решение для повышения производительности без ущерба для качества конечных результатов.

Shuffle свип-сигнал

На рис. 3.7 показан случайный свип-сигнал, сгенерированный в случайном порядке, предложенный Коротковым и Жуковым в 2017 году. Черная линия на рис. 3.7 (а) представляет

время-частотную зависимость линейного свип-сигнала, а синяя линия – время-частотную зависимость свип-сигнала Shuffle, сгенерированного в случайном порядке. Рис. 3.7 (b) показывает линейный свип-сигнал, а рис. 3.7 (c) – сгенерированный случайный свип-сигнал Shuffle (Zhukov et al., 2017). Неоднократные эксперименты подтверждают, что случайные свип-сигналы обладают однородным спектром и управляемыми амплитудными вариациями в заданном диапазоне частот. Их применение позволяет снизить вероятность повреждения инфраструктуры, улучшить низкочастотное разрешение данных и минимизировать корреляционные шумы (Жуков, 2022).

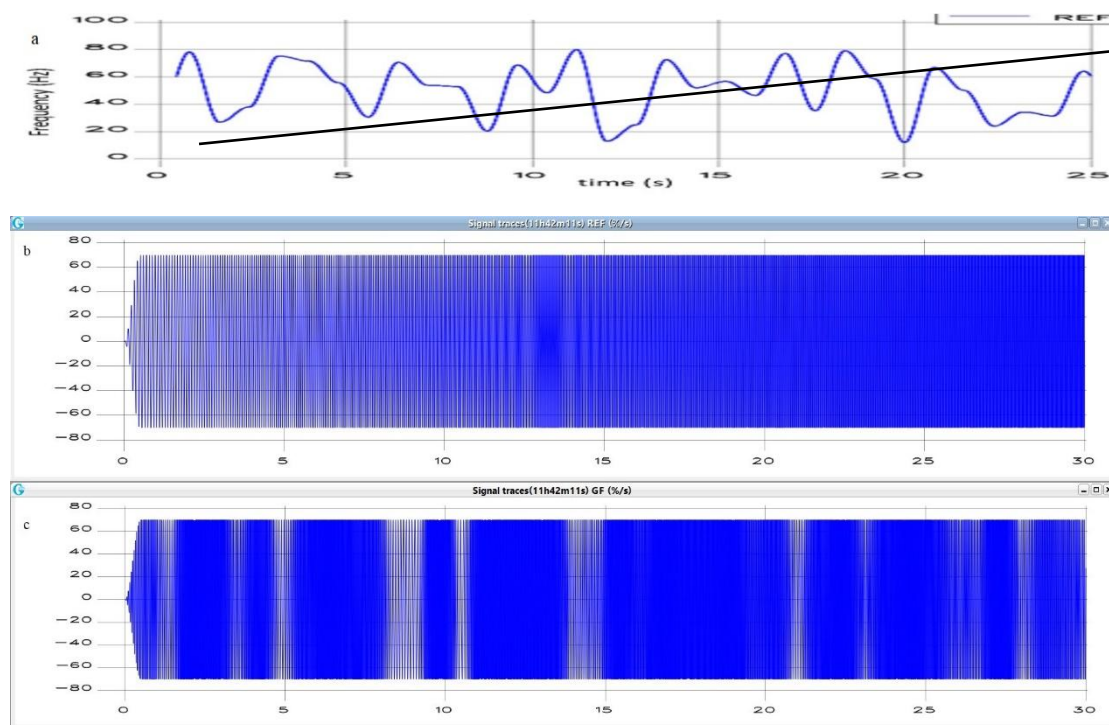


Рисунок 3.7. (a) Черная линия отображает частотно-временную зависимость линейного свип-сигнала, а синяя линия – частотно-временную зависимость свип-сигнала Shuffle, (b) линейный свип-сигнал, (c) сгенерированный случайный свип-сигнал Shuffle (Zhukov et al., 2017).

3.2. Случайные и псевдослучайные последовательности

Случайные последовательности – это последовательности чисел, которые не поддаются предсказанию и не могут быть воспроизведены, зная алгоритм и исходные данные. Дважды запустив генератор случайных чисел в одинаковых условиях, мы получим разные последовательности. Для их создания обычно используют специальное случайное начальное значение, называемое «зерном».

Псевдослучайные последовательности – это последовательности, генерируемые детерминированными алгоритмами, которые стремятся имитировать по своим характеристикам действительно случайные последовательности.

Псевдослучайные последовательности обладают характеристиками, схожими с случайными. Они демонстрируют хорошую случайность, а их корреляционные функции близки к корреляционным функциям белого шума. Псевдослучайная двоичная последовательность является частным случаем псевдослучайной последовательности, где элементы могут принимать два возможных значения: 0 и 1. Существует несколько типов псевдослучайных последовательностей, среди которых наиболее известны М-последовательность, последовательность Gold и последовательность Kasami (Gold, 1976; Kasami, 1966).

М-последовательность, или последовательность максимальной длины, представляет собой псевдослучайную двоичную последовательность, сформированную с использованием регистра сдвига с линейной обратной связью (LFSR), как показано на рис. 3.8. Регистр состоит из функциональных ячеек памяти, каждая из которых хранит текущее состояние (значение) одного бита. Количество ячеек n , называют длиной регистра. Биты (ячейки) обычно нумеруются индексами $i = 0, 1, \dots, n-1$, а содержимое i -й ячейки обозначается как $b_{(n-1)-i}$. Значение нового бита b_n определяется до сдвига битов, и только после сдвига это значение записывается в ячейку 0, а из ячейки $n-1$ извлекается очередной сгенерированный бит.

Функция обратной связи для LFSR представляет собой линейную булеву функцию от значений всех или некоторых битов регистра. Эта функция выполняет умножение битов регистра на коэффициенты c_i , где $i = 1, 2, \dots, n$. Количество коэффициентов совпадает с количеством битов регистра n . Каждый коэффициент c_i может принимать значения $\{0, 1\}$, при этом последний коэффициент c_n всегда равен 1, поскольку LFSR задается характеристическим многочленом степени n . Сложение по модулю 2 (операция «XOR», обозначаемая символом « \oplus ») является линейной булевой функцией, и именно эта операция чаще всего используется в регистрах с линейной обратной связью. При этом биты, которые являются переменными функции обратной связи, называют отводами, а сам регистр – конфигурацией Фибоначчи.

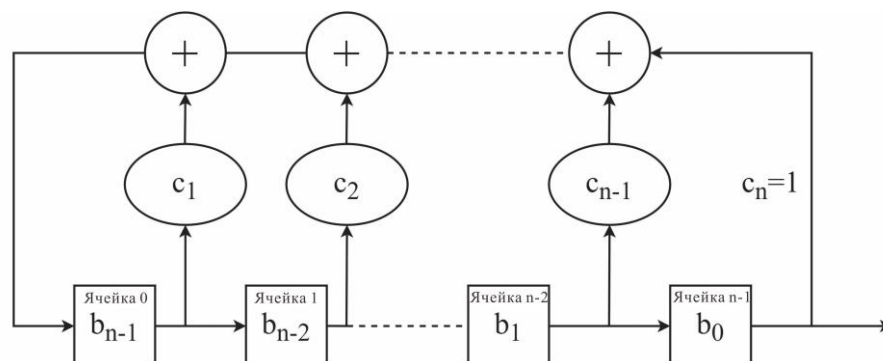


Рисунок 3.8. Регистр сдвига с линейной обратной связью.

М-последовательности являются периодическими с периодом $N = 2^n - 1$, где n – длина регистра сдвига. Они также используются для формирования других видов псевдослучайных

последовательностей. М-последовательности обладают рядом преимуществ, в частности, их автокорреляционная функция сходна с автокорреляционной функцией идеального импульса и аппроксимирует автокорреляционную функцию дискретного белого шума. В результате они характеризуются широкой спектральной составляющей.

М-последовательности обладают следующими свойствами (Варакин, 1985):

- М-последовательности являются периодическими с периодом $N = 2^n - 1$.
- Количество символов, принимающих значение единицы, в одном периоде М-последовательности на единицу больше, чем количество символов, принимающих значение нуля.
- Любая возможная комбинация из n символов встречается в одном периоде М-последовательности не более одного раза, за исключением комбинации, состоящей из n нулей.
- Сумма по модулю 2 любой М-последовательности с её произвольным циклическим сдвигом также является М-последовательностью.
- Периодическая автокорреляционная функция любой М-последовательности имеет постоянный уровень боковых лепестков, равный $\frac{-1}{N}$.

На рис. 3.9 (а) и 3.9 (b) представлены случайная и псевдослучайная последовательности после полосовой фильтрации с частотными диапазонами 3–5–147–150 Гц. Длительность последовательностей составляет 8 и 4 секунды соответственно. Полосовая фильтрация привела их спектры в соответствие с диапазоном, характерным для сейсмических данных. На рис. 3.9 (d) показано, что уровень корреляционного шума псевдослучайной последовательности ниже, чем случайной последовательности (рис. 3.9 (с)), несмотря на вдвое меньшую длительность первой. Эти результаты подтверждают возможность использования псевдослучайных последовательностей для повышения эффективности вибрационной сейсморазведки и улучшения качества регистрируемых сейсмических данных.

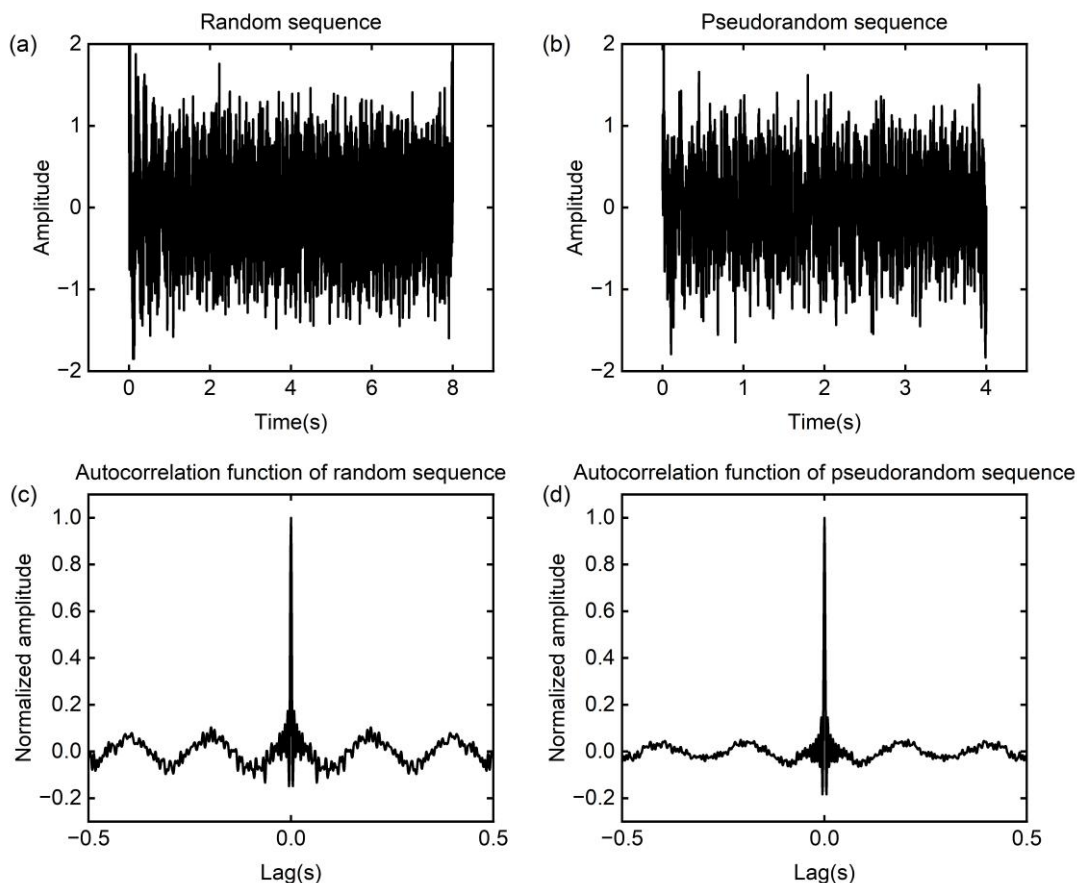


Рисунок 3.9. Последовательности после полосовой фильтрации и их нормализованные автокорреляционные функции, (a) случайная последовательность, (b) псевдослучайная последовательность, (c) автокорреляционная функция случайной последовательности, (d) автокорреляционная функция псевдослучайной последовательности.

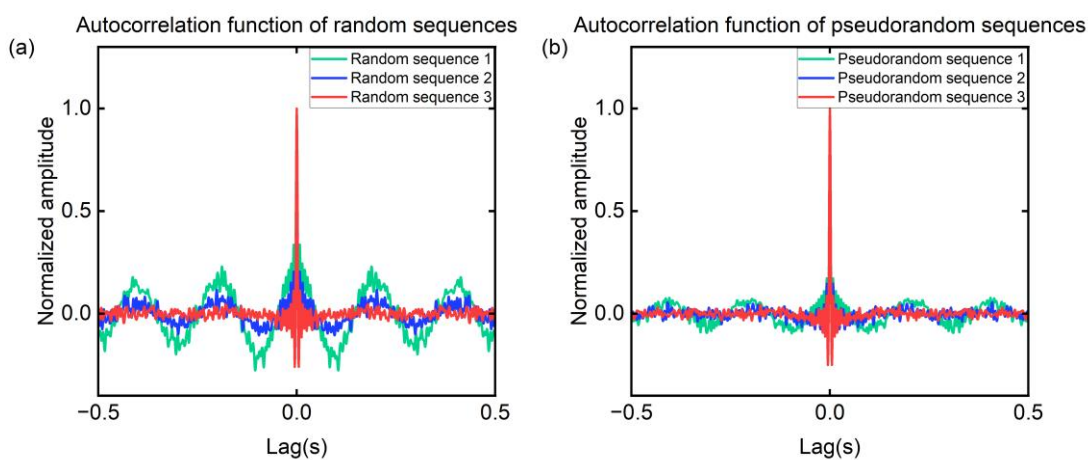


Рисунок 3.10. Влияние длины последовательностей на уровень корреляционного шума, (a) автокорреляционные функции случайных последовательностей различной длины, (b) автокорреляционные функции псевдослучайных последовательностей различной длины.

На рис. 3.10 (a) и 3.10 (b) представлены автокорреляционные функции случайных и псевдослучайных последовательностей различной длины. Для случайных последовательностей использованы длины 2, 5 и 10 секунд, аналогичные значения применены для псевдослучайных последовательностей. Как видно из рис. 3.10, увеличение длины последовательности приводит к снижению уровня корреляционного шума. Кроме того, при одинаковой длине уровень корреляционного шума у псевдослучайных последовательностей ниже, чем у случайных (Sarwate et al., 1980).

Этот результат подтверждает известный факт из радиотехники: псевдослучайные последовательности обладают меньшим уровнем корреляционного шума по сравнению со случайными последовательностями той же длины (Варакин, 1985). Ранее использование псевдослучайных последовательностей в вибрационной сейсморазведке было затруднено из-за ограничений в управлении гидравлическими системами вибраторов (Zhukov, 2013). Однако недавние достижения в технологиях управления вибраторами позволяют генерировать свип-сигналы с заданными амплитудно-частотными характеристиками (Korotkov, 2020; Адиев и др., 2023).

3.3. Генерация псевдослучайных свип-сигналов на основе технологии фазовой манипуляции

Псевдослучайные двоичные последовательности широко используются благодаря их благоприятным автокорреляционным свойствам. Это делает псевдослучайные свип-сигналы, основанные на таких последовательностях, перспективными для применения в методах одновременного возбуждения.

В данной главе представлен усовершенствованный метод генерации псевдослучайных свип-сигналов, основанный на подходе, предложенном Wischmeyer (Wischmeyer, 1966). Разработаны три новых типа псевдослучайных свип-сигналов, которые сохраняют частотные характеристики линейных 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.

Предложенные модификации позволяют сохранить частотный состав линейных свип-

сигналов при улучшении их корреляционных характеристик.

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. 3.11 (а)). Эта последовательность используется для манипуляции полярностью сегментов синусоидальных или линейных свип-сигналов.

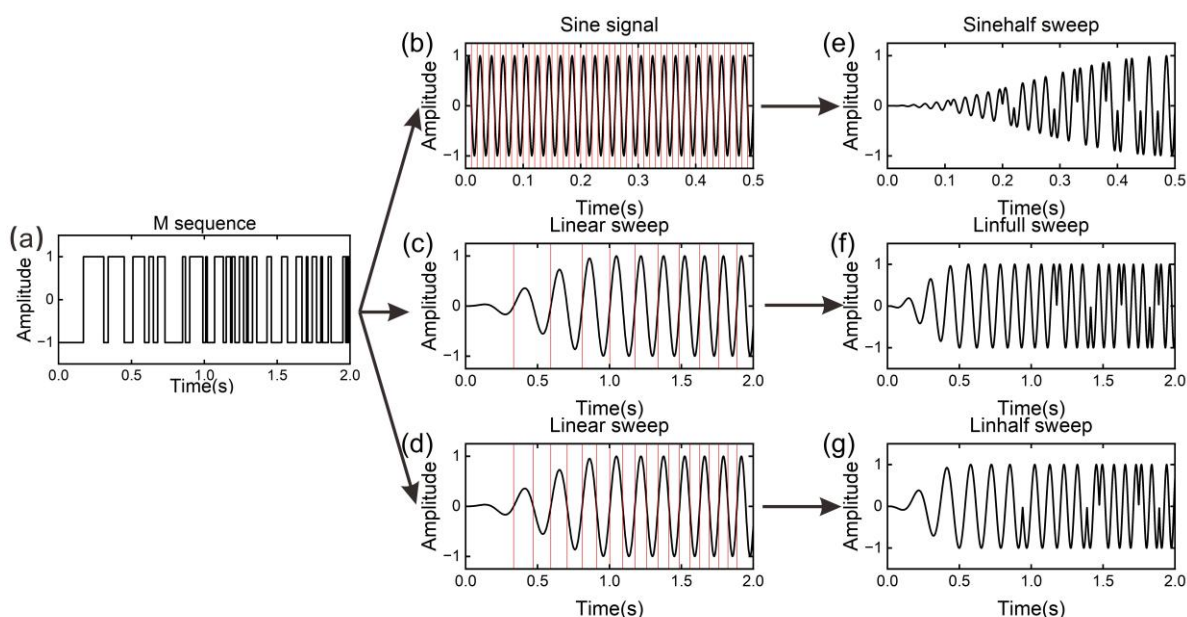


Рисунок 3.11. Схема формирования псевдослучайных свип-сигналов, (а) М-последовательность, (б) синусоидальный сигнал с частотой 50 Гц, (с) линейный свип-сигнал (полный период), (д) линейный свип-сигнал (половина периода), (е) псевдослучайный свип-сигнал Sinehalf, (ф) псевдослучайный свип-сигнал Linfull, (г) псевдослучайный свип-сигнал Linhalf.

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. 3.11 (б)). Для линейного свип-сигнала сегменты могут охватывать полный период (рис. 3.11 (с)) или половину периода (рис. 3.11 (д)). 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 (е)) – 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.

Сви́п-сигналы Linfull и Linhalf сохраняют частотные характеристики исходного линейного сви́п-сигнала, что делает их перспективными для применения в вибрационной сейсморазведке.

На рис. 3.11 (e) представлен псевдослучайный сви́п-сигнал Sinehalf, сформированный на основе М-последовательности (рис. 3.11 (a)) и синусоидального сигнала с частотой 50 Гц (рис. 3.11 (b)). Его общая длина составляет 32 секунды, а конусный участок имеет продолжительность 0,5 секунды как в начале, так и в конце.

На рис. 3.11 (f) показан псевдослучайный сви́п-сигнал Linfull, сгенерированный с использованием М-последовательности (рис. 3.11 (a)) и линейного сви́п-сигнала (рис. 3.11 (c)).

На рис. 3.11 (g) изображён псевдослучайный сви́п-сигнал Linhalf, который был сформирован с использованием М-последовательности (рис. 3.11 (a)) и линейного сви́п-сигнала (рис. 3.11 (d)).

Линейные сви́п-сигналы, представленные на рис. 3.11 (c) и рис. 3.11 (d), имеют идентичные параметры, частотный диапазон 3–100 Гц, общая длительность 32 секунды, а длина конусного участка составляет 0,5 секунды как в начале, так и в конце.

На рис. 3.12 представлены амплитудные спектры различных сви́п-сигналов. Анализ спектров показывает, что амплитудные характеристики псевдослучайных сви́п-сигналов близки к спектру белого шума и обладают выраженными псевдослучайными свойствами.

Несмотря на различия в исходных сигналах, используемых для их генерации, спектры различных псевдослучайных сви́п-сигналов демонстрируют значительное сходство. Например, сви́п-сигнал Sinehalf, сформированный на основе моно-частотного сигнала, обладает достаточно широким спектром, что подчеркивает его потенциал для применения в сейсморазведке.

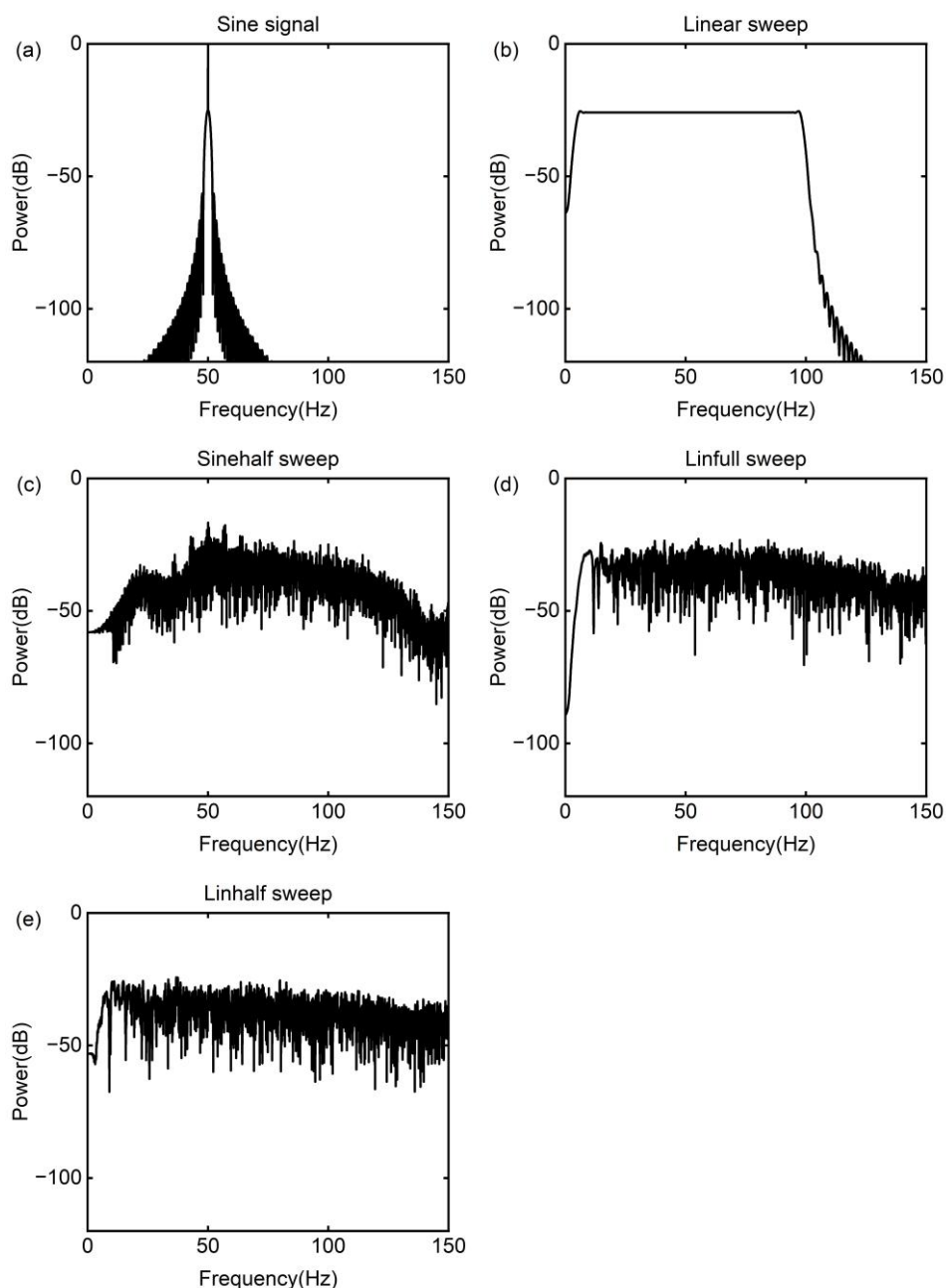


Рисунок 3.12. Спектры свип-сигналов, (а) синусоидального сигнала (50 Гц), (б) линейного свип-сигнала, (с) псевдослучайного свип-сигнала Sinehalf, (д) псевдослучайного свип-сигнала Linfull, (е) псевдослучайного свип-сигнала Linhalf.

3.4. Математическое описание новых псевдослучайных свип-сигналов

На основе рассмотренного метода были разработаны три новых типа псевдослучайных свип-сигналов, математическое представление которых можно выразить в виде следующих формул.

(1) Свип-сигнал Sinehalf

Начнем с определения функции синус. Пусть исходный сигнал представляет собой синусоидальную функцию с частотой f_0 Гц, тогда его можно записать в виде:

$$x(t) = \sin(2\pi f_0 t) \quad (3.1)$$

Для управления фазой сигнала используется псевдослучайная последовательность М-последовательность $\{m_n\}$, элементы которой принимают значения 0 или 1. М-последовательность определяет изменение фазы каждого полупериода сигнала следующим образом:

$$m_n \in \{0,1\} \quad (3.2)$$

Изменение фазы в каждом полупериоде:

Для n -го полупериода сигнала фаза изменяется следующим образом:

- Если $m_n = 0$, сигнал сохраняет исходную фазу.
- Если $m_n = 1$ фаза сдвигается на π .

Определение полупериода и времени:

Время одного полного периода сигнала обозначим как

$$T_{half} = \frac{1}{2f_0} \quad (3.3)$$

Если длина М-последовательности составляет N , то общее время сигнала равно:

$$T = N * T_{half} \quad (3.4)$$

Определение полупериода для текущего времени t :

Номер текущего полупериода n для времени t можно вычислить следующим образом:

$$n(t) = \left\lfloor \frac{t}{T_{half}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{2f_0 t}{1} \right\rfloor = \lfloor 2f_0 t \rfloor \quad (3.5)$$

Здесь $\lfloor \cdot \rfloor$ обозначает функцию взятия целой части (округление вниз).

Итоговое уравнение сигнала:

Объединяя все элементы, получаем выражение для синусоидального сигнала с псевдослучайной модуляцией фазы:

$$y(t) = \sin(2\pi f_0 t + \pi m_{n(t)}) \quad (3.6)$$

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

Линейный свип-сигнал можно описать следующим уравнением:

$$x(t) = \sin \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{f_1 - f_0}{2T} t^2 \right) \right) \quad (3.7)$$

Для управления фазой сигнала применяется М-последовательность $\{m_k\}$, каждый элемент которой может принимать значения 0 или 1:

$$m_k \in \{0,1\} \quad (3.8)$$

Данная последовательность определяет фазовый сдвиг сигнала в каждом полном периоде. Предположим, что М-последовательность имеет длину N, что означает, что линейный свип-сигнал состоит из N полных периодов.

Разделение сигнала на сегменты:

Для упрощения анализа сигнал разбивается на несколько временных сегментов $y_k(t_{2k})$, где каждый сегмент включает один положительный полупериод и один отрицательный полупериод и два перехода через нулевую. Первый нулевой переход происходит в момент времени $t = 0$.

Обозначим временной вектор для k -го полного периода как t_{2k} .

Контроль фазы в каждом сегменте:

Фаза каждого сегмента определяется элементом М-последовательности m_k :

Если $m_k = 0$, сигнал сохраняет исходную фазу.

Если $m_k = 1$, фазовый сдвиг составляет π .

Математическое выражение для k -го сегмента:

Каждый сегмент $y_k(t_{2k})$ может быть представлен следующим образом:

$$y_k(t_{2k}) = \sin \left(2\pi \left(f_0 t_{2k} + \frac{f_1 - f_0}{2T} t_{2k}^2 \right) + \pi m_k \right) \quad (3.9)$$

Итоговое уравнение сигнала:

Объединяя все элементы, получаем выражение:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{k=N} y_k(t_{2k}) = \sum_{k=1}^{k=N} \sin \left(2\pi \left(f_0 t_{2k} + \frac{f_1 - f_0}{2T} t_{2k}^2 \right) + \pi m_k \right) \quad (3.10)$$

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 M -последовательности, значения из множества $\{0,1\}$.

(3) Свип-сигнал Linhalf

Предположим, что исходный сигнал представляет собой линейный свип-сигнал, который можно описать выражением:

$$x(t) = \sin \left(2\pi \left(f_0 t + \frac{f_1 - f_0}{2T} t^2 \right) \right) \quad (3.11)$$

Для управления фазовыми сдвигами сигнала используется псевдослучайная последовательность $M = \{m_k\}$, где каждый элемент последовательности может принимать значение 0 или 1:

$$m_k \in \{0,1\} \quad (3.12)$$

Элементы M -последовательности задают фазовый сдвиг на каждом полупериоде линейного свип-сигнала. Предположим, что длина M -последовательности равна N , что соответствует N полупериодом сигнала.

Разделение сигнала на сегменты:

Для упрощения анализа линейный свип-сигнал можно разделить на несколько временных сегментов $y_k(t_k)$, каждый из которых включает либо один положительный полупериод, либо один отрицательный полупериод. Каждый сегмент пересекает нулевой уровень один раз, причем первый нулевой переход происходит в момент времени $t = 0$.

Обозначим временной вектор для k -го полупериода как t_k .

Контроль фазы в каждом сегменте:

Фаза сигнала в каждом сегменте определяется элементом m_k из M -последовательности:

Если $m_k = 0$, сигнал сохраняет свою исходную фазу.

Если $m_k = 1$, к фазе добавляется сдвиг на π .

Математическое выражение для k -го сегмента:

$$y_k(t_k) = \sin \left(2\pi \left(f_0 t_k + \frac{f_1 - f_0}{2T} t_k^2 \right) + \pi m_k \right) \quad (3.13)$$

Итоговое уравнение сигнала:

Объединяя все элементы, получаем выражение:

$$y(t) = \sum_{k=1}^{k=N} y_k(t_k) = \sum_{k=1}^{k=N} \sin \left(2\pi \left(f_0 t_k + \frac{f_1 - f_0}{2T} t_k^2 \right) + \pi m_k \right) \quad (3.14)$$

Где:

t_k – временной вектор для k-го полупериода, секунд.

f_0 и f_1 – начальная и конечная частоты сигнала, Гц.

m_k – элемент M-последовательности, который принимает значения из множества $\{0,1\}$.

3.5. Численное моделирование псевдослучайных свип-сигналов

Для оценки эффективности применения трёх псевдослучайных свип-сигналов (Sinehalf, Linfull, Linhalf) в сейсморазведке было проведено численное моделирование. В исследовании использовались как одномерные, так и двумерные геологические модели, что позволило получить всестороннюю оценку результатов.

Результаты моделирования для пяти различных свип-сигналов (Lin, Shuffle, Linfull, Linhalf и Sinehalf) были сопоставлены с результатами, полученными при использовании традиционных свип-сигналов. Параметры и характеристики свип-сигналов приведены в таблице 3.1, а их визуализация представлена на рис. 3.13.

№	сви́пы	частотный диапазон/Гц	длина/с	описание свипов
1	Lin	3-100	16	Линейный свип-сигнал
2	Shuffle	3-100	32	Shuffle (случайный свип-сигнал)
3	Linfull	3-100	16	М-последовательность манипулирует полярности сегментов линейного свип- сигнала (полный период)
4	Linhalf	3-100	16	М-последовательность манипулирует полярности сегментов линейного свип- сигнала (половина периода)
5	Sinehalf	50	16	М-последовательность манипулирует полярности сегментов синусоидального сигнала (половина периода)

Таблица 3.1. Свип-сигналы для численного моделирования.

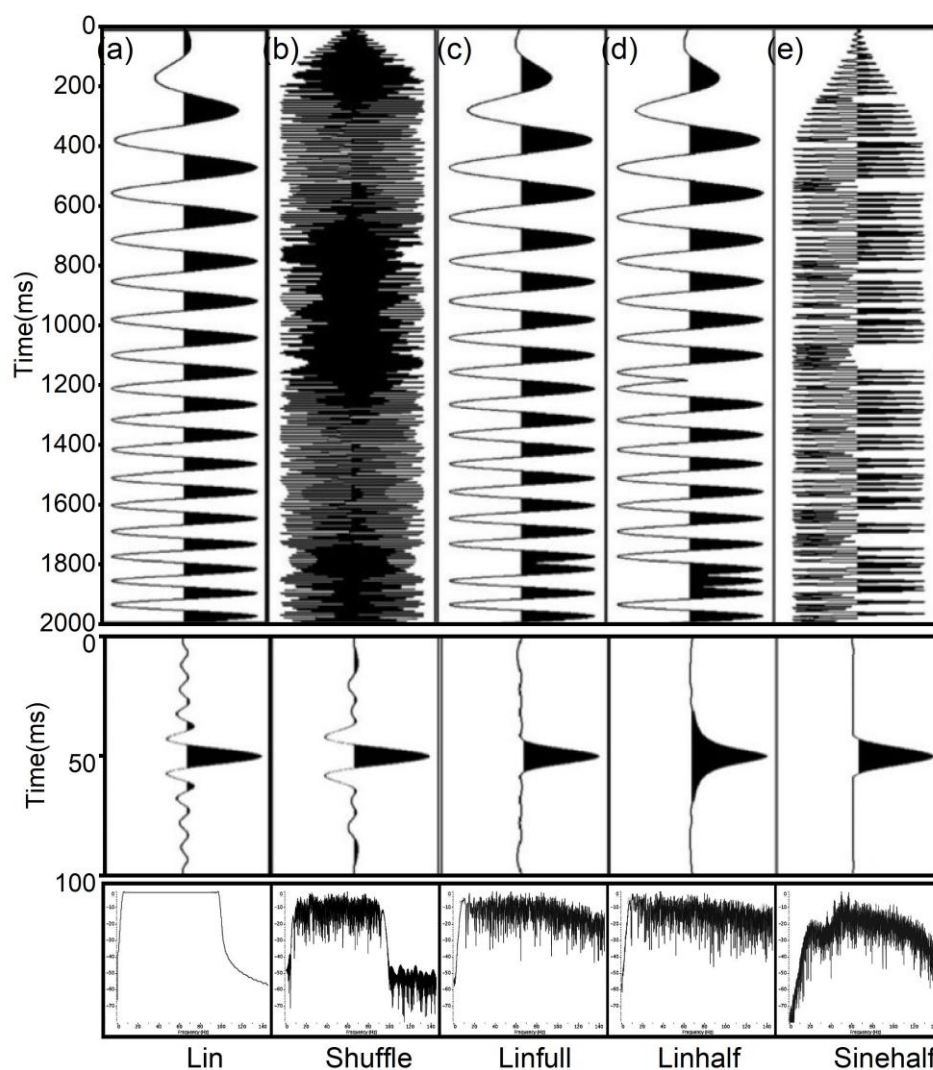


Рисунок 3.13. Свип-сигналы (в верхней части), их автокорреляционные функции (в центральной части) и спектры (в нижней части).

Как показано на рис. 3.13, спектр свип-сигнала Lin имеет стандартную прямоугольную форму. Спектр свип-сигнала Shuffle аналогичен спектру Lin, но с рядом отличий. Спектр свип-сигнала Sinehalf быстро затухает при частотах выше 150 Гц. В свою очередь, спектры свип-сигналов Linfull демонстрируют сходство с спектром свип-сигнала Linhalf, постепенно уменьшаясь с увеличением частоты.

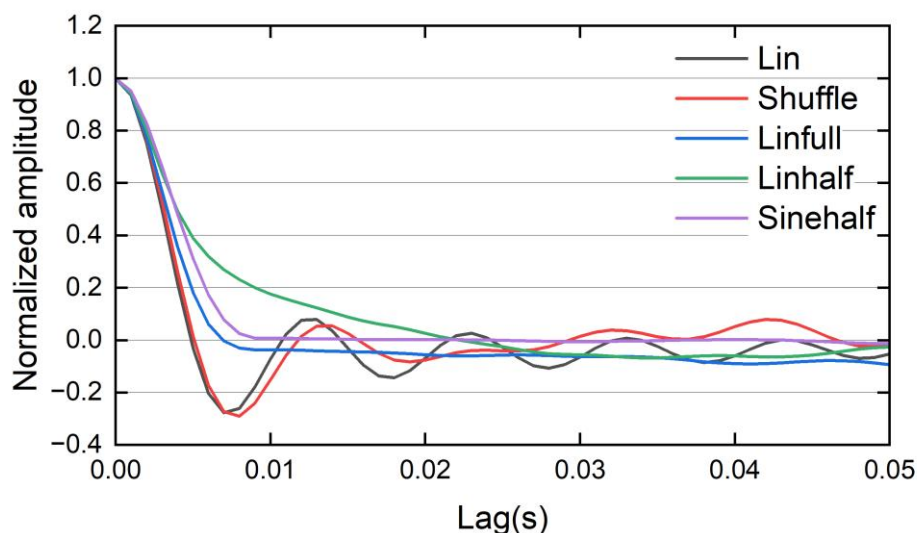


Рисунок 3.14. Нормированные автокорреляционные функции свип-сигналов

На рис. 3.14 представлены нормированные автокорреляционные функции различных свип-сигналов. Автокорреляционные функции свип-сигналов Lin и Shuffle очень схожи, особенно в области первого бокового лепестка. Однако наблюдается различие в скорости затухания боковых лепестков: у свип-сигнала Lin затухание происходит быстрее, чем у свип-сигнала Shuffle. Боковые лепестки автокорреляционной функции Sinehalf свип-сигнала затухают наиболее быстро, при этом демонстрируют наименьшие и более стабильные средние значения. Свип-сигнал Linfull также характеризуется более быстрым затуханием боковых лепестков по сравнению с свип-сигналом Linhalf. Несмотря на более медленное затухание боковых лепестков автокорреляционной функции Linhalf свип-сигнала вблизи основного экстремума, эти лепестки сохраняют стабильность и постепенно стремятся к нулю по мере удаления от основного экстремума.

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. 3.15).

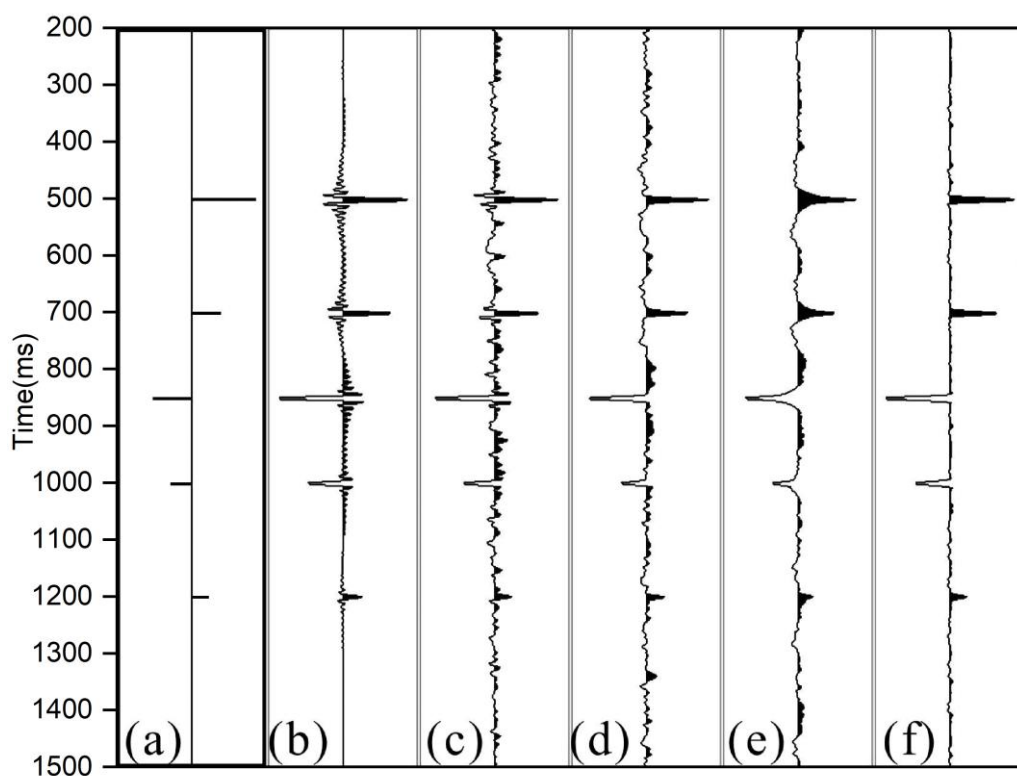


Рисунок 3.15. Сейсмические записи одномерного моделирования (качество трасс улучшается слева направо). (a) модель коэффициента отражения, (b) Lin свип-сигнал, (c) Shuffle свип-сигнал, (d) Linfull свип-сигнал, (e) Linhalf свип-сигнал, (f) Sinehalf свип-сигнал.

На рис. 3.15 представлены пять сейсмических записей, полученных с использованием различных свип-сигналов. Сейсмическая запись, полученная с использованием Lin свип-сигнала, характеризуется более высоким уровнем корреляционного шума вблизи основного экстремума, после чего следует его быстрое затухание. Запись, полученная с использованием Shuffle свип-сигнала, демонстрирует наибольший уровень корреляционного шума и выраженные боковые лепестки. С другой стороны, запись, полученная с использованием Sinehalf свип-сигнала, отличается наименьшим уровнем корреляционного шума и более четким основным экстремумом. Сейсмические записи, полученные с использованием Linfull и Linhalf свип-сигналов, имеют более низкий уровень корреляционного шума по сравнению с записью, полученной с Shuffle свип-сигналом. Однако главные лепестки автокорреляционных функций этих записей шире, а боковые лепестки затухают медленнее.

Двумерное моделирование

На рис. 3.16 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.

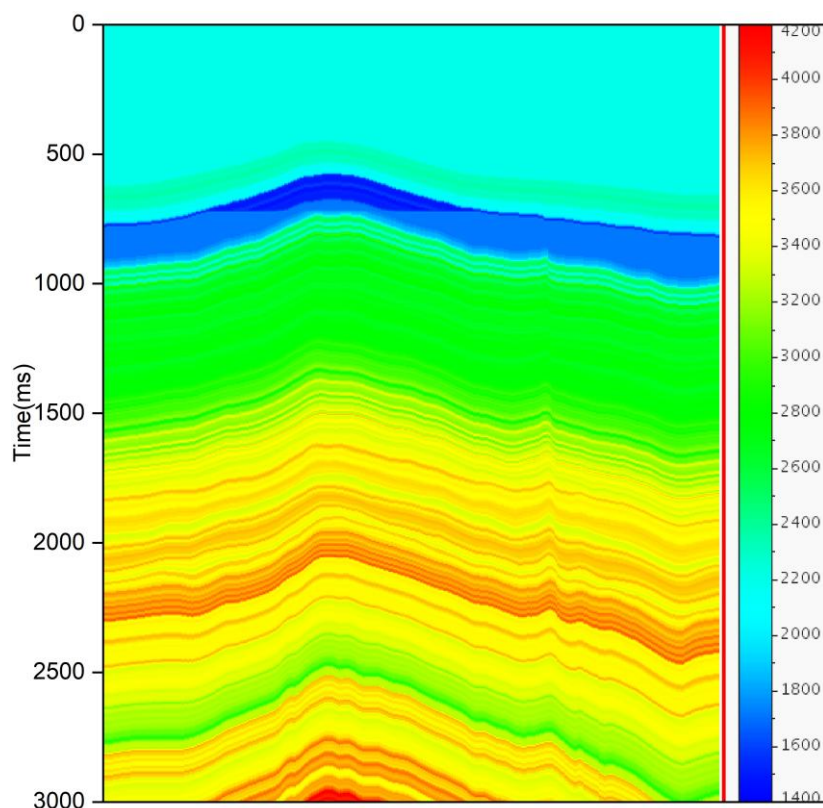


Рисунок 3.16. Двумерная геологическая модель

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. 3.17, включая временные разрезы до обработки и после обработки.

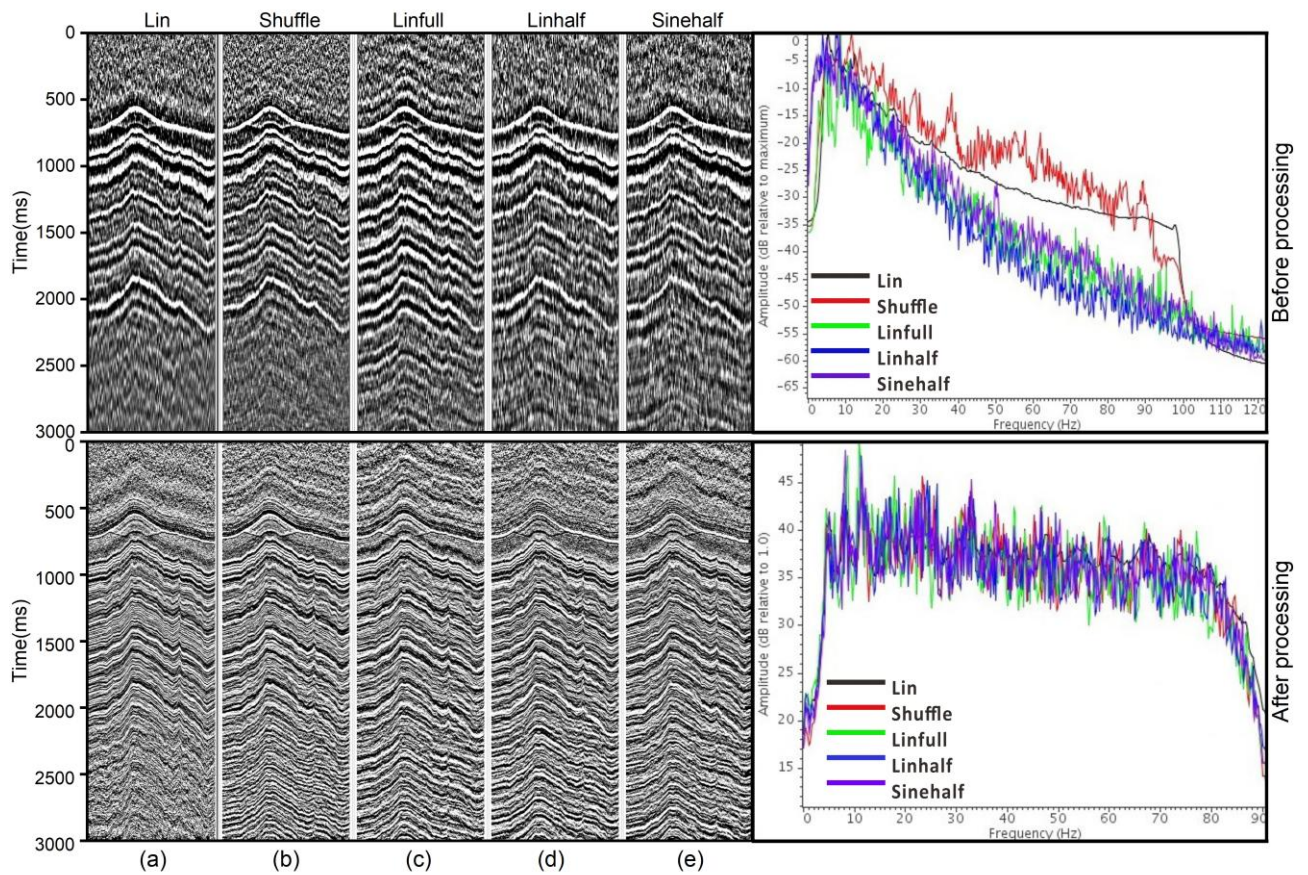


Рисунок 3.17. Временные разрезы и их спектры, до обработки (вверху) и после обработки (внизу). (a) Lin свип-сигнал, (b) Shuffle свип-сигнал, (c) Linfull свип-сигнал, (d) Linhalf свип-сигнал, (e) Sinehalf свип-сигнал.

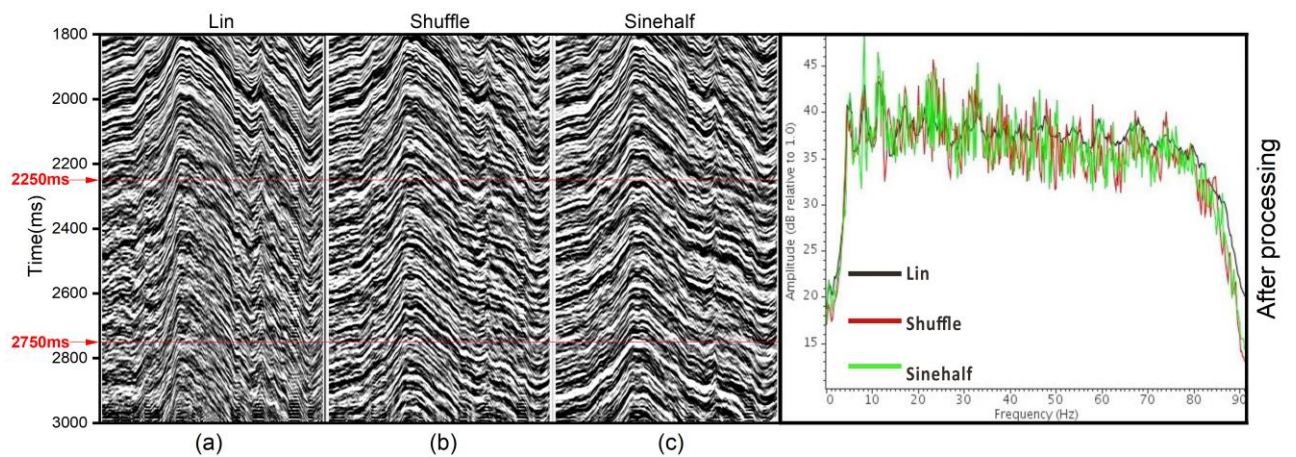


Рисунок 3.18. Временные разрезы (1800–3000 мс) и их спектры (после обработки). (a) Lin свип-сигнал, (b) Shuffle свип-сигнал, (c) Sinehalf свип-сигнал.

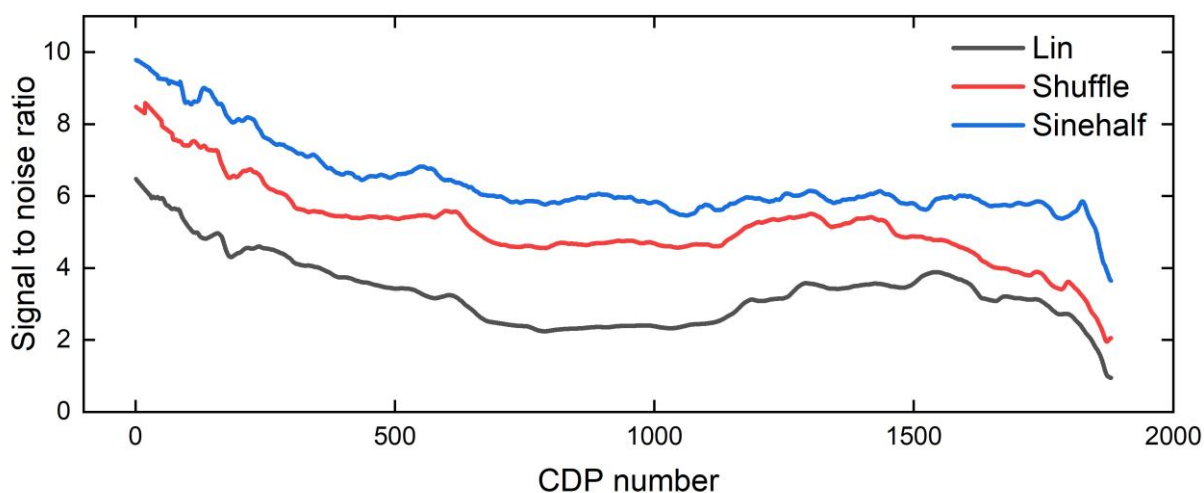


Рисунок 3.19. Соотношения сигнал/шум, рассчитанные в временном диапазоне 2250–2750 мс (красные стрелки на рис. 3.18).

Для двумерного численного моделирования сейсмических данных использовались одинаковые параметры для всех свип-сигналов, а обработка данных проводилась по единому графу обработки. Временные разрезы, полученные до и после обработки, показаны на рис. 3.17. Для более детального анализа были выбраны временные разрезы после обработки для трех свип-сигналов: Lin, Shuffle и Sinehalf (рис. 3.18). На временных разрезах видно, что спектральный состав данных практически идентичен, однако наблюдаются различия в соотношении сигнал/шум. Соотношение сигнал/шум для временных разрезов, построенных с использованием свип-сигналов Lin, Shuffle и Sinehalf, представлено на рис. 3.19.

Очевидно, что временной разрез, построенный с использованием свип-сигнала Sinehalf, демонстрирует наилучшую четкость, высокое разрешение и минимальный уровень шума по сравнению с разрезами, полученными с использованием других свип-сигналов. На этом разрезе все тонкие слои, расположенные над газовой ловушкой, четко различимы. Временной разрез, построенный с использованием свип-сигнала Lin, характеризуется более высоким уровнем корреляционного шума, что приводит к снижению четкости, особенно в нижней части разреза, где тонкие слои не могут быть четко разделены. Временной разрез, построенный с использованием свип-сигнала Shuffle, имеет средний уровень корреляционного шума, что затрудняет различение некоторых пластов, особенно расположенных ближе к поверхности. Временные разрезы, полученные с использованием свип-сигналов Linfull и Linhalf, демонстрируют низкие уровни корреляционного шума, обеспечивая лучшее различение пластов по сравнению со свип-сигналами Lin и Shuffle.

Из результатов двумерного моделирования можно сделать вывод, что временной разрез, полученный с использованием свип-сигнала Lin, имеет наихудшее разрешение, в то время как

разрез, полученный с использованием свип-сигнала Shuffle, обладает хорошим разрешением, но требует в два раза больше времени по сравнению с другими свип-сигналами. Разрез, полученный с использованием свип-сигнала Sinehalf, имеет наилучшее разрешение. По сравнению с случайным свип-сигналом Shuffle, новые псевдослучайные свип-сигналы позволяют сэкономить 50% времени, улучшить отношение сигнал/шум в несколько раз и обеспечить более четкое изображение более глубоких слоев.

3.6. Выводы

В данной главе предложены новые псевдослучайные свип-сигналы, которые могут быть эффективно реализованы на электромеханическом вибраторе. Результаты численного моделирования подтверждают перспективность применения этих псевдослучайных свип-сигналов для повышения эффективности сейсморазведки и улучшения соотношения сигнал/шум.

В дальнейшем планируется проведение полевых экспериментов с использованием электромеханического вибратора для тестирования предложенных свип-сигналов. Эти эксперименты позволят оценить их эффективность и применимость в реальных условиях сейсморазведки.

Кроме того, перспективным направлением исследований является разработка нелинейных псевдослучайных последовательностей для генерации свип-сигналов. Это направление может привести к созданию более эффективных сигналов, что, в свою очередь, расширит возможности современных методов сейсморазведки.

ГЛАВА 4. ПОЛЕВЫЕ ТЕСТЫ НОВЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СВИП-СИГНАЛОВ³

В данной главе представлены результаты полевых испытаний, проведённых с целью оценки эффективности предложенных псевдослучайных свип-сигналов в условиях реальной сейсморазведки. Был выполнен комплекс экспериментов, направленных на изучение влияния различных управляемых свип-сигналов на качество полно-волновых сейсмических изображений при фиксированных параметрах сейсмической съемки, в сравнении со стандартным линейным свип-сигналом. В качестве источника упругих колебаний использовался лёгкий электромеханический вибратор, генерирующий как продольные (P), так и поперечные (S) волны. Испытания проводились на 220-метровом профильном участке, проложенном вдоль тротуара университетского кампуса. В ходе эксперимента были протестированы семь типов свип-сигналов, включая один случайный и пять закодированных псевдослучайных свип-сигналов, которые представляют особый интерес с точки зрения повышения производительности крупномасштабных 3D-съемок. Помимо этого, был испытан эквивалентный свип-сигнал, сформированный на основе детерминированного вейвлета Рикера, что должно было способствовать улучшению корреляции отражённых сигналов. Результаты испытаний показали, что применение управляемых свип-сигналов позволяет существенно повысить качество сейсмических изображений. При этом псевдослучайные свип-сигналы продемонстрировали потенциал как для увеличения производительности, так и для повышения качества получаемых данных. В данном разделе подробно рассматриваются параметры эксперимента, методология обработки данных и сравнительный анализ полученных результатов (Ван и др., 2025).

4.1. Свип-сигналы для теста

Мотивация использования псевдослучайных свип-сигналов состоит в нескольких аспектах. Во-первых, первоначальная цель их внедрения заключалась в снижении энергии боковых лепестков автокорреляционной функции и сокращении их длительности, что непосредственно влияет на улучшение соотношения сигнал/шум (Bruno, 2023). Во-вторых, псевдослучайные свип-сигналы эффективно уменьшают уровень шума, возникающего от соседних групп вибраторов при применении высокопроизводительных методов вибрационной

³ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. 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)).

сейсморазведки. Наконец, благодаря использованию псевдослучайных последовательностей такие сигналы характеризуются более широким частотным спектром по сравнению с традиционными линейными и случайными свип-сигналами, что обеспечивает повышение разрешающей способности полно-волновых сейсмических изображений.

В исследовании использовался стандартный линейный свип-сигнал с частотным диапазоном от 3 до 100 Гц как базовый пример для сравнения с другими свип-сигналами (рис. 4.1 (а)). Одним из альтернативных сигналов был случайный Shuffle свип-сигнал (рис. 4.1 (b)), который, как известно, может быть использован с большинством вибрационных источников. Этот сигнал ранее показал улучшение эффективности вибросейсмических работ (Zhukov et al., 2017). Однако его использование требует увеличения длительности до 40–60 секунд для улучшения корреляционных характеристик, что может снижать производительность метода независимого одновременного возбуждения (ISS) (Korotkov et al., 2023). Альтернативным способом повышения корреляционных свойств является применение псевдослучайных последовательностей, известных в радиотехнике. Эти последовательности имеют меньшую длину и устойчивы к внешнему шуму при сохранении или улучшении корреляционных характеристик (Varakin, 1985). На основе этих данных были разработаны пять псевдослучайных свип-сигналов, основанных на М-последовательностях. Два из них (рис. 4.1 (с) и 4.1 (d)) были созданы путем изменения полярности полного или половинного периода линейного свип-сигнала в соответствии с отрицательным кодом М-последовательности, что позволило сохранить его частотное содержание. Для других сигналов (рис. 4.1 (е), 4.1 (f), 4.1 (g)) использовались моночастотные синусоидальные сигналы с частотами 30, 50 и 70 Гц, где полярность сегментов половины периода изменялась в зависимости от кода М-последовательности. Восьмой сигнал (рис. 4.1 (h)) был эквивалентом теоретической вейвлеты Рикера с центральной частотой 50 Гц, которая может служить оптимальным фильтром для идентификации отражённых сигналов определённой формы. Процесс его формирования включает несколько этапов: Вейвлет Рикера создается с использованием MATLAB, полученный сигнал конвертируется в формат SEG-Y для совместимости с программным обеспечением обработки данных, в специализированной программе Pulse to Sweep вейвлет трансформируется в нелинейный свип-сигнал (Ван и др., 2025).

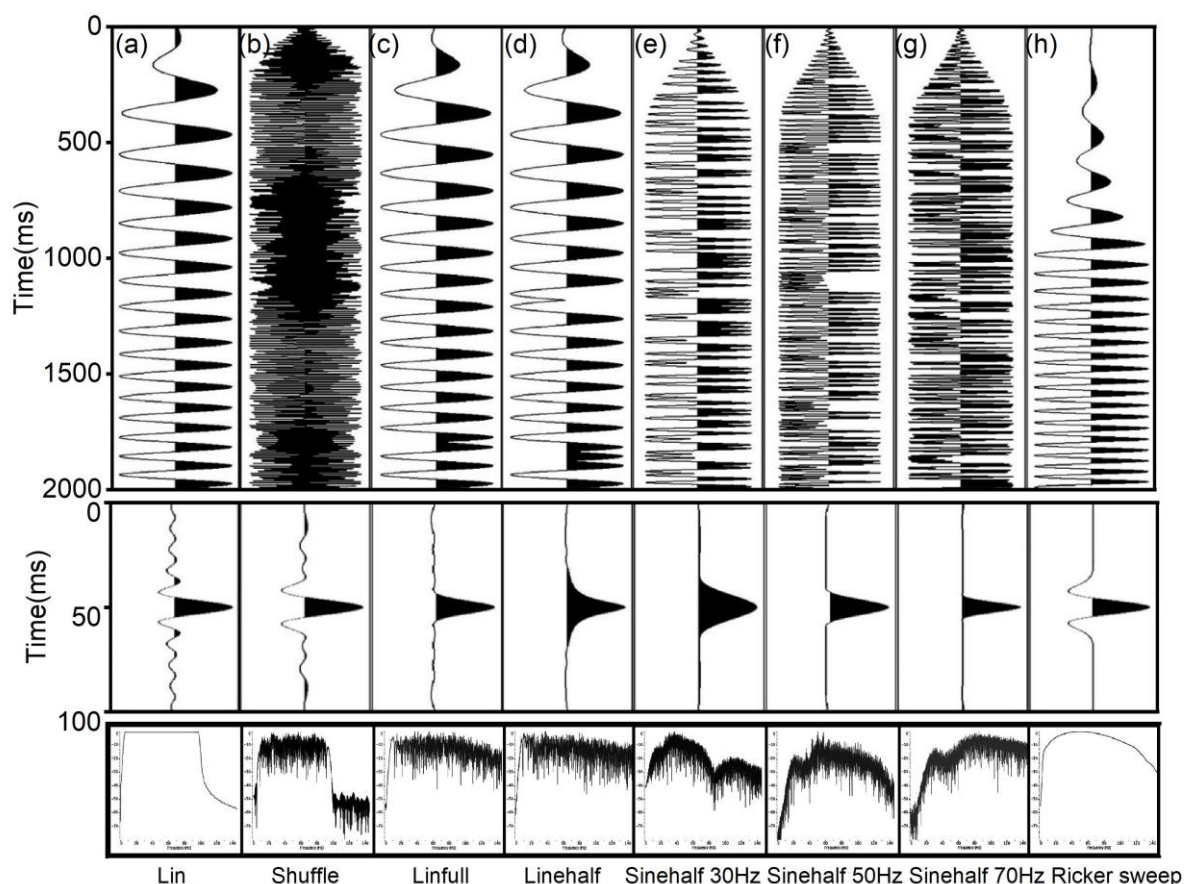


Рисунок 4.1. Свип-сигналы для тестирования (вверху), их автокорреляционные функции (в центре) и спектры (внизу).

4.2. Условия проведения полевых работ

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.

На рис. 4.2 представлена карта исследуемого района с трассами сейсмической съемки. Красная линия обозначает 2D-сейсмическую линию, протянувшуюся по территории Российского университета дружбы народов (РУДН), расположенного в юго-западной части Москвы. Линия съемки протяженностью 222,5 метра ориентирована с юго-запада на северо-восток и разделена на четыре участка. На линии размещены 75 трехкомпонентных геофонов с интервалом 2,5 метра, а источники возбуждения расположены с шагом 5 метров, образуя 45 точек.

Московский регион занимает центральную часть Восточно-Европейской платформы. Как и другие платформенные территории, его структура включает два основных уровня: кристаллический фундамент и осадочные породы. Нижний уровень состоит из архейских и

протерозойских магматических и метаморфических пород, таких как гнейсы, амфиболиты и сланцы, залегающих на глубинах от 1000 до 4200 метров. Верхний уровень представлен палеозойскими, мезозойскими и кайнозойскими отложениями с максимальной толщиной до 2500 метров.

Юго-запад Москвы, где расположен РУДН, характеризуется относительно стабильным стратиграфическим строением верхних слоев. До глубины 1100 метров преобладают мезозойские и кайнозойские осадочные породы, включая четвертичные суглинки, глины и пески (0–100 метров), неогеновые и меловые песчаники и глины (3–100 метров), а также юрские глины и мергели (60–125 метров). На глубинах более 1100 метров встречаются карбоновые, девонские и рифейские отложения, а ниже – вендские и кристаллические породы.

Тектоническая активность в регионе привела к появлению разрывных нарушений в глубоких слоях, тогда как верхние слои остаются относительно однородными и стратифицированными. Это обуславливает их непрерывный, слоистый характер на сейсмических разрезах (Osipov, 2015; Вагнер и др., 2003).

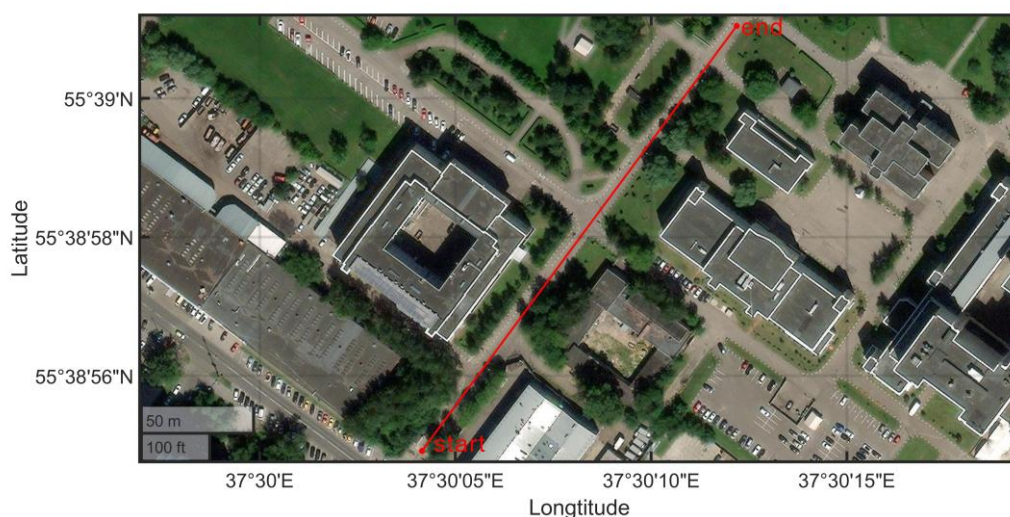


Рисунок 4.2. Местоположение опытной линии и исследуемого района. Красная линия обозначает типичную 2D-сейсмическую линию, ориентированную с юго-запада на северо-восток.

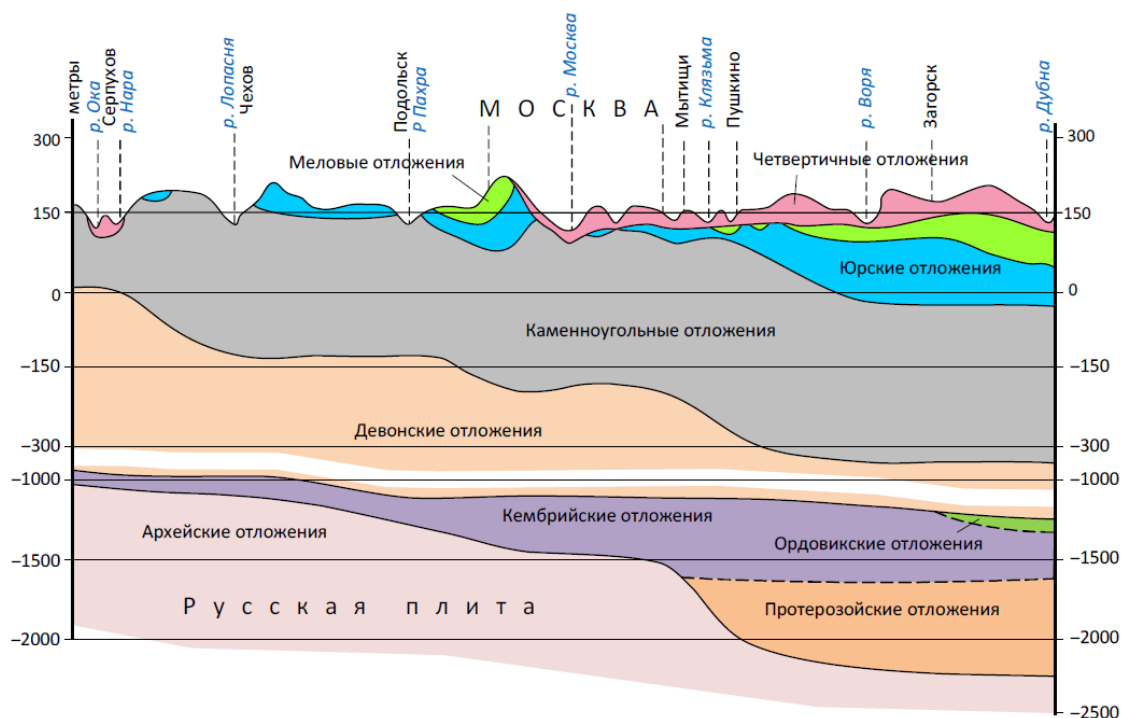


Рисунок 4.3. Геологический разрез по линии р. Ока - Москва - р. Дубна (Из атласа Московской области 1964 года.)

4.3. Сбор сейсмических данных

На рис. 4.4 представлены основные компоненты оборудования, использованного в полевых испытаниях. Экспериментальные двумерные сейсмические исследования проводились в городской среде на территории университетского кампуса вдоль 222,5-метрового профиля, проложенного по асфальтированному тротуару (рис. 4.2). В качестве вибрационного источника использовался электромеханический вибратор Lightning, обеспечивающий возбуждение как продольных (Р-волн), так и поперечных (S-волн) колебаний (рис. 4.4 (с), 4.4 (d)).

Перемещение вибратора осуществлялось с помощью вездехода «Лесник» (рис. 4.4 (а)). Регистрация сейсмических данных производилась с использованием трехкомпонентных беспроводных узлов SCOUT (рис. 4.4 (b)), установленных вдоль профиля с шагом 2,5 м на газоне в 1 м от края линии. Эти устройства фиксировали отражённые и конвертированные волны в режиме распределённой беспроводной регистрации.

Эксперимент включал два прохода вдоль профиля. В первом проходе использовался режим возбуждения Р-волн, при котором вибратор находился в вертикальном положении. Во втором проходе, для возбуждения S-волн, вибрационный источник вручную поворачивался на 90° перед началом тестирования. В каждом из 45 пунктов сейсмического возбуждения, расположенных через каждые 5 м, последовательно воспроизводились восемь типов свип-сигналов.

Длительность каждого сигнала составляла 20 секунд, за исключением случайного Shuffle-сигнала, который длился 40 секунд для повышения качества регистрации. Запись данных после каждого сигнала продолжалась в течение 5 секунд.

Электромеханический вибратор Lightning обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными гидравлическими вибраторами. Его масса значительно меньше – всего 90 кг, что делает его удобным для мобильного использования. Вибратор оснащён линейным электродвигателем, который генерирует электромагнитное усилие и передаёт его на плиту через демпфирующую пружину (Noorlandt et al., 2015). Переключение на режим S-волн осуществляется путём ручного поворота вибрационного блока, что упрощает подготовку к полевым работам.

Применение лёгкого вибратора особенно эффективно для неглубоких инженерных исследований, где требуется регистрация многокомпонентных данных на глубинах до нескольких сотен метров. Благодаря его компактности и простоте эксплуатации проведение экспериментов не требует большого числа персонала. Двухдневные испытания, включавшие восемь типов свип-сигналов, подтвердили возможность использования данного оборудования для полно-волновых исследований. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения электромеханического вибратора как для неглубоких инженерных исследований, так и для крупномасштабных высокопроизводительных исследований в режиме возбуждения Р-волн.

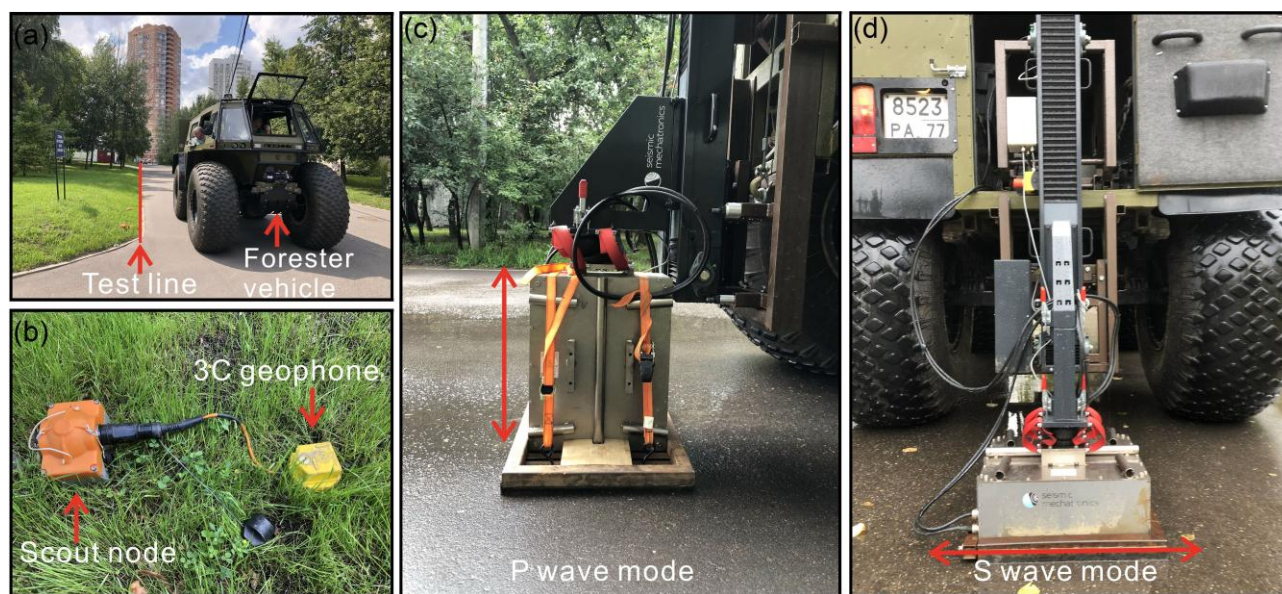


Рисунок 4.4. Расположение опытной линии и используемого оборудования. (а) Трасса опытной линии и транспортное средство с вибрационным источником, (б) беспроводная система SCOUT и трёхкомпонентный сейсмоприёмник, (с) вибрационный источник в режиме возбуждения Р-волн, (д) вибрационный источник в режиме возбуждения S-волн.

4.4. Обработка данных и результаты

Для анализа полного записанного волнового поля 6С были выделены компоненты, соответствующие исключительно Р-Р и S-S монотипным отражённым данным с одинаковой поляризацией. Для Р-волн использовалась вертикальная компонента (Z-Z), а для S-волн – горизонтальная (Y-Y). После отбора данных выполнялась корреляция, а затем полученные коррелограммы обрабатывались по стандартному графу обработки. Этот граф включал этапы усиления, деконволюции, статической коррекции, подавления шума, выравнивания по NMO, суммирования по ОГТ и постсуммирования (Duan et al., 2023).

На рис. 4.5 представлены временные разрезы, полученные после обработки данных для восьми типов свип-сигналов, как в случае Р-Р волн (верхняя часть), так и S-S волн (нижняя часть). Анализ результатов показал, что, несмотря на использование идентичного графа обработки, временные разрезы демонстрируют существенные различия.

В частности, по сравнению с результатами для линейного свип-сигнала (рис. 4.5 (a)), другие свип-сигналы обеспечивают более детализированное отображение геологических структур и увеличенную глубину проникновения. Псевдослучайные свип-сигналы, такие как Sinehalf с частотами 30, 50 и 70 Гц (рис. 4.5 (e), (f) и (g)), демонстрируют значительное улучшение разрешения временных разрезов. Это подтверждает возможность управления качеством сейсмических данных путём варьирования частотного содержания сигнала.

На рис. 4.5 (h) представлены разрезы, полученные с использованием Ricker свип-сигнала. Данные разрезы характеризуются высокой контрастностью и улучшенной детализацией, превосходя результаты для линейного свип-сигнала (рис. 4.5 (a)). Высокое качество временных разрезов, полученных с Ricker свип-сигналом, объясняется его эффективностью в качестве согласованного фильтра, что соответствует теоретическим ожиданиям.

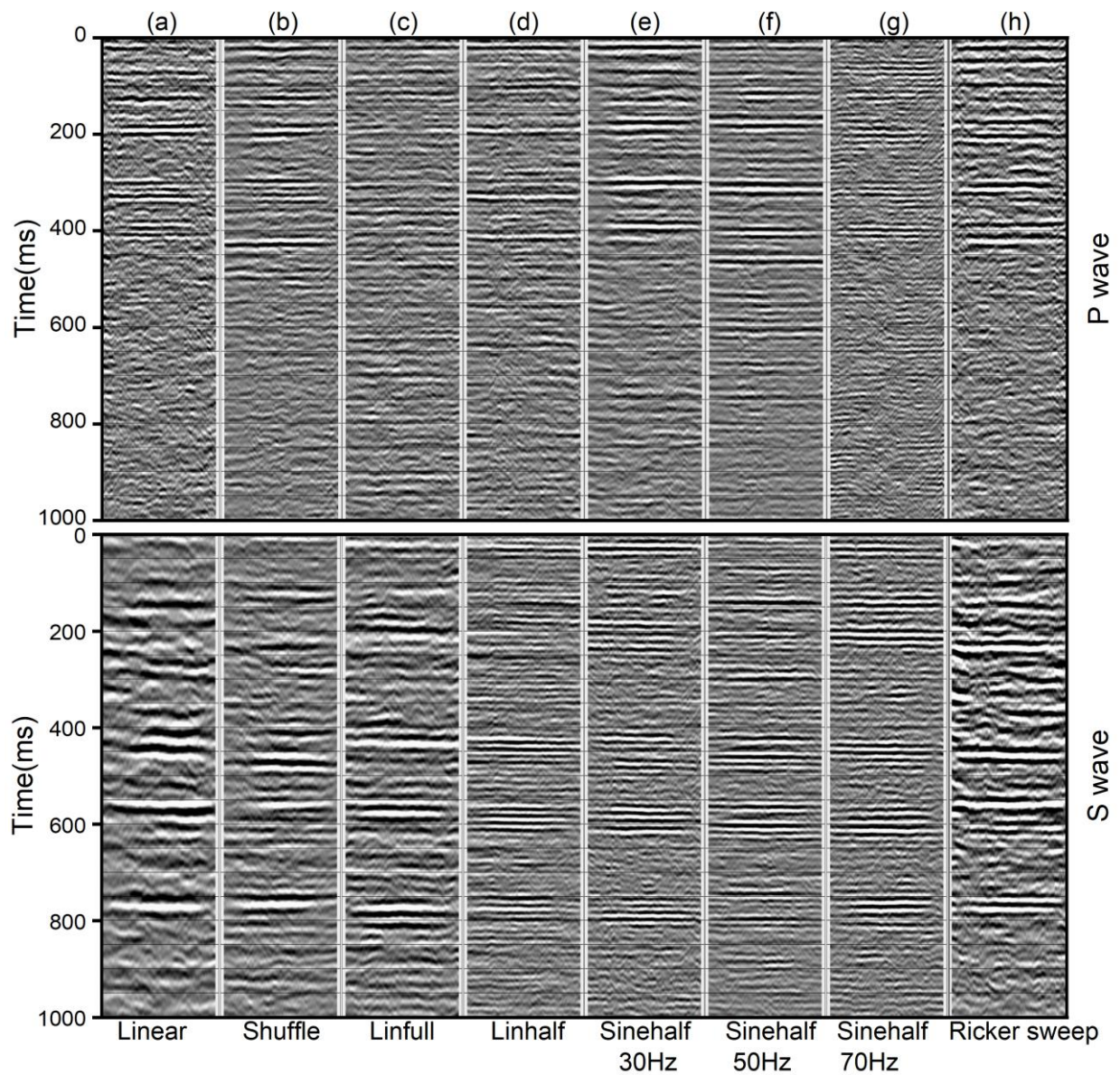


Рисунок 4.5. Временные разрезы для Р-волн (верхний ряд) и S-волн (нижний ряд), полученные с использованием различных свип-сигналов. (a) Линейный свип-сигнал, (b) Shuffle свип-сигнал, (c) Linfull свип-сигнал, (d) Linhalf свип-сигнал, (e) Sinehalf 30 Гц, (f) Sinehalf 50 Гц, (g) Sinehalf 70 Гц, (h) Ricker свип-сигнал.

Для идентификации отражателей Р- и S-волн, связанных с одними и теми же геологическими границами, были проанализированы соответствующие временные разрезы. Для согласования событий применялась стандартная методика регистрации, широко используемая при обработке данных полного волнового поля. Оценка среднего отношения V_p/V_s , выполненная после регистрации событий, показала значение около 2,0.

На завершающем этапе обработки данные были преобразованы в глубинные разрезы с использованием среднеквадратичных скоростей Р-волн. На рис. 4.6 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. 4.6 (e). Особенно следует отметить верхнюю границу девонских отложений, четко отображенную на глубине около 400 м (рис. 4.6 (d), черная стрелка). Эта граница, ранее недостаточно выраженная на приповерхностных сейсмических разрезах региона, теперь представлена значительно более точно благодаря использованию псевдослучайного свип-сигнала.

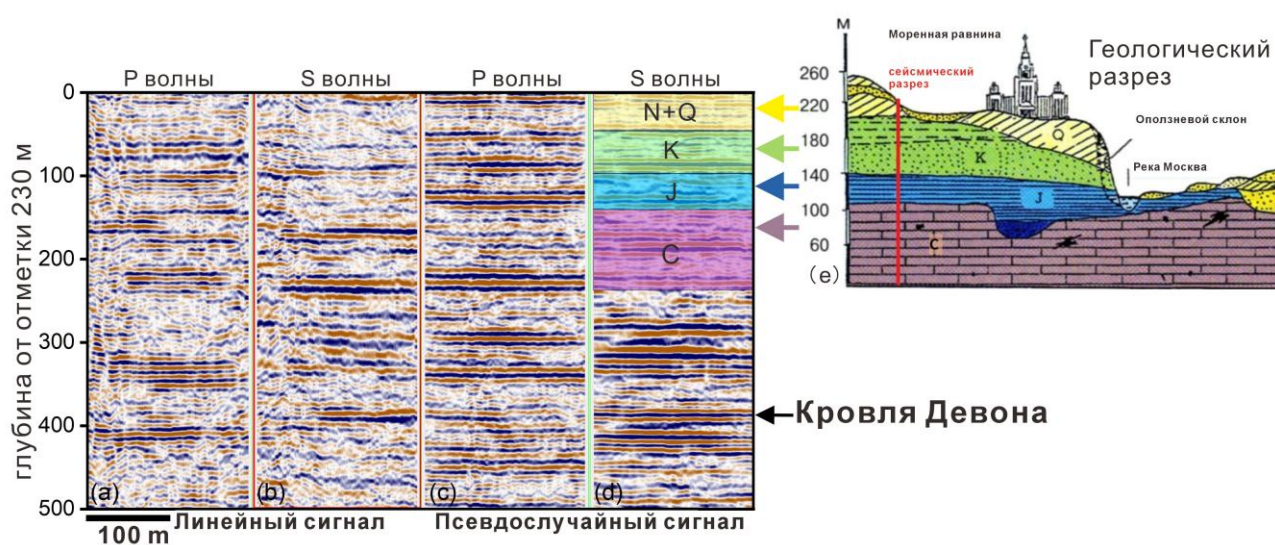


Рисунок 4.6. Сравнение глубинных разрезов, полученных с использованием линейного и Sinehalf 50 Гц свип-сигналов. (a) Линейный свип-сигнал (Р-волны), (b) линейный свип-сигнал (S-волны), (c) Sinehalf 50 Гц свип-сигнал (Р-волны), (d) Sinehalf 50 Гц свип-сигнал (S-волны), (e) геологический разрез с указанием положения сейсмических разрезов (красная линия) и геологических интервалов, соответствующих сейсмическому разрезу, полученному с использованием псевдослучайных свип-сигналов (цветные стрелки).

4.5. Выводы

Результаты исследования подтверждают, что применение управляемых свип-сигналов значительно улучшает качество получаемых сейсмических изображений без необходимости увеличения усилий на проведение съемки. Кодированные короткие псевдослучайные свип-сигналы демонстрируют эффективность, сопоставимую с более длительными случайными сигналами, что способствует улучшению как производительности технологий ISS, так и качества изображений.

Псевдослучайные свип-сигналы обладают высокой степенью управляемости и устойчивостью к шуму, что делает их перспективным инструментом для сейсмических исследований. Детерминированный Ricker свип-сигнал, благодаря фокусировке энергии в определенном спектральном диапазоне, обеспечивает более четкую корреляцию отраженных сигналов и может быть использован для оптимизации обработки данных.

Легкий электромеханический вибратор подтвердил свою эффективность при проведении исследований полного волнового поля в приповерхностных условиях, особенно в городской среде. Его использование в качестве тестового инструмента позволяет оперативно проводить эксперименты с управляемыми источниками свип-сигналов, открывая новые перспективы для развития методов сейсморазведки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 высокомоощных

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адиев Т.Р. Вибросейсмическая полевая методика независимого одновременного возбуждения нескольких управляемых Q-свилов для совместного увеличения производительности работ и улучшения качества данных / Т.Р. Адиев, И.П. Коротков // Геофизика. – 2023. № 6. – С. 16–21.
2. Бондарь Е.В., Борцов А.В., Шишкин А.А. и др., Отчет о результатах обработки и интерпретации материалов сейсморазведочных работ 3D МОГТ на Правобережном участке Астраханского свода, ООО «Геофизические системы данных», Москва, 2006
3. Быстрова И.В. Особенности палеотектонического развития астраханского свода и перспективы нефтегазоносности западной части прикаспийской впадины / И.В. Быстрова, Т.С. Смирнова, Н.Ф. Федорова, Р.Т. Мангаладзе // Геология, география и глобальная энергия. – 2017. – № 3. – С. 77–86.
4. Вагнер Б.Б. Геология, рельеф и полезные ископаемые Московского региона / Б.Б. Вагнер, Б.О. Манучарянц. – М: Издательство МГПУ. – 2003, – С. 215.
5. **Ван Ж.** Исследование и моделирование новых методов генерации псевдослучайных свип-сигналов / Ж. Ван, И. П. Коротков, А. П. Жуков // Геофизика – 2025. – № 1 – С. 28 – 34. EDN: BZOILZ (0.81 п.л., вклад автора 85%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ)).
6. **Ван Ж.** Многоволновой сейсмический эксперимент по тестированию управляемых псевдослучайных и детерминированного свип-сигналов / Ж. Ван, И. П. Коротков, А. П. Жуков // Геофизика. – 2025. – № 1 – С. 74 – 79. EDN: DFTSQN (0.69 п.л., вклад автора 80%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ)).
7. **Ван Ж.** Полевые сейсморазведочные работы 2D с целью определения оптимальной методики для солянокупольной тектоники на левобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения / Ж. Ван, А. П. Жуков, Р. М. Калимулин // 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)).
8. **Ван Жуйчжэ.** Возможности оптимизации снижения уровня корреляционных шумов за счет использования Зингеровых кодов / Жуйчжэ Ван, А.П. Жуков // Международная конференция: Труды V Международной геолого-геофизической конференции «ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес», Том III (III), – С. 64–66. EDN: JTBAGC.
9. **Ван Жуйчжэ.** Использование зингеровых кодов для полного подавления боковых лепестков корреляционных функций вибрационных данных / Жуйчжэ Ван // Международная

- конференция: Сатпаевские чтения – 2022. тренды современных научных исследований, 2022.
10. Ван Жуйчжэ. Сравнение взрывных данных с данными, полученными по различным модификациям адаптивных технологии / Жуйчжэ Ван // Международная Конференция: Ломоносов -2021 подсекция сейсмометрия и геоакустика, 2021.
 11. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Издательство Радио и связь. – 1985. – 384 с.
 12. Великанов Э.Б. Об экологической обстановке в районе Астраханского газоконденсатного месторождения / Э.Б. Великанов, Ю.С. Чуйков // Астраханский вестник экологического образования. – 2014. – № 14. – С. 192–200.
 13. Демидова Е.И. Из истории Астраханского газового комплекса / Е.И. Демидова, Е.А. Ефимова, А.В. Захаров, В.Ю. Быков // Научный журнал Российского газового общества. – 2016. – № 1. – С. 71–80.
 14. Жуков А.П. Адаптивные технологии вибрационной сейсморазведки. Часть 1 / А.П. Жуков, И.П. Коротков, А.И. Тищенко // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2021. – № 2. – С. 44–57.
 15. Жуков А.П. Сейсморазведка с вибрационными источниками / А.П. Жуков, С.В. Колесов, Г.А. Шехтман, М.Б. Шнеерсон. – Тверь: Издательство ГЕРС. – 2011. – 411 с.
 16. Жуков А.П. Теоретические и методические основы вибрационной сейсморазведки: учебное пособие / А.П. Жуков. – М.: Издательство МГУ, Университетская книга. – 2022. – 116 с.
 17. Кострыгин Ю.П. Вибросейсмический и кодоимпульсный методы сейсмической разведки / Ю.П. Кострыгин. – Краснодар: Издательство Просвещение-Юг. – 2014. – 494 с.
 18. Кострыгин Ю.П. Сейсморазведка на сложных сигналах / Ю.П. Кострыгин. – Тверь: Издательство ГЕРС. – 2002. – 415 с.
 19. Кострыгин Ю.П. Эффективность двухполярных импульсных последовательностей при кодоимпульсном возбуждении сейсмических колебаний / Ю.П. Кострыгин // Разведочная геофизика. – М.: Издательство Недра. – 1991. – С. 15–21.
 20. Леонов Ю.Г., Волож Ю.А. Осадочные бассейны: методика изучения, строение и эволюция, М.: Научный мир, 2004.
 21. Шехтман Г.А. Многоволновое ВСП на оптоволоконном кабеле / Г.А. Шехтман, А.П. Жуков, Р.М. Калимулин, Жуйчжэ Ван // Геофизика, 2025, № 3, С. 67-73. EDN: YPJNOK (0.81 п.л., вклад автора 30%, Импакт-фактор 0,342 (РИНЦ).
 22. Шнеерсон М.Б. Вибрационная сейсморазведка / М.Б. Шнеерсон. – М.: Издательство Недра. – 1990. – 240 с.
 23. Шнеерсон М.Б. Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки / М.Б. Шнеерсон. – М.: Издательство Недра. – 1998. – 527 с.

24. Abma R.L. High quality separation of simultaneous sources by sparse inversion / R.L. Abma, T. Manning, M. Tanis, J. Yu, M. Foster // 72nd EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010. – European Association of Geoscientists & Engineers. – 2010. – P. cp-161-00019.
25. Allen K.P. High fidelity vibratory seismic (HFVS) method for acquiring seismic data / K.P. Allen, M.L. Johnson, J.S. May // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 1998. – Society of Exploration Geophysicists. – 1998. – P. 140–143.
26. Askeland B. A seismic field test with a Low-level Acoustic Combustion Source and Pseudo-Noise codes / B. Askeland, B.O. Ruud, H. Hobæk, R. Mjelde // Journal of Applied Geophysics. – 2009. – vol. 67.
27. Bagaini C. Acquisition and processing of simultaneous vibroseis data / C. Bagaini // Geophysical Prospecting. – 2010. – vol. 58. – P. 81–100.
28. Bagaini C. Dithered slip-sweep acquisition / C. Bagaini, Y. Ji // SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG. – 2010. – SEG-2010-0091.
29. Bagaini C. Low-frequency vibroseis data with maximum displacement sweeps / C. Bagaini // The Leading Edge. – 2008. – vol. 27. – P. 582–591.
30. Bathellier E. Broadband and High Performance Vibroseis for high-density wideazimuth land acquisition / E. Bathellier // ASEG Extended Abstracts. – 2012. – № 1. – P. 1–4.
31. Bernhardt T., Peacock J.H. Encoding Techniques for the Vibroseis* System / T. Bernhardt, J.H. Peacock // Geophysical Prospecting. – 1978. – vol. 26 – № 1. – P. 184–193.
32. Bouska J. Distance separated simultaneous sweeping, for fast, clean, vibroseis acquisition / J. Bouska // Geophysical Prospecting. – 2010. – vol. 58. – P. 123–153.
33. Bouska J. Distance separated simultaneous sweeping: Efficient 3D vibroseis acquisition in Oman / J. Bouska // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2009. – Society of Exploration Geophysicists 2009. – P. 1–5.
34. Bruno P.P.G. Seismic Exploration Methods for Structural Studies and for Active Fault Characterization: A Review / P.P.G. Bruno // Applied Sciences. – 2023. – vol. 13. – P. 9473.
35. Burger P. New vibrator control concept offers industrial use of pseudorandom sweeps in populated areas / P. Burger, P. Baliguet // SEG Technical Program Expanded Abstracts 1992. – Society of Exploration Geophysicists, 1992. – P. 687–689.
36. Chen Y. Iterative deblending of simultaneous-source seismic data using seislet-domain shaping regularization / Y. Chen, S. Fomel, J. Hu // Geophysics. – 2014. – vol. 79 – № 5. – P. 179–189.
37. Chen Y. Random noise attenuation by fx empirical-mode decomposition predictive filtering / Y. Chen, J. Ma // Geophysics. – 2014. – vol. 79 – № 3. – P. 81–91.
38. Crawford J.M. Continuous signal seismograph / J.M. Crawford, W.E.N. Doty, M.R. Lee // Geophysics. – 1960. – vol. 25. – № 1. – P. 95–105.

39. Crook T.N., Ball J.D., Hubbard C.L. Method and apparatus for continuous wave seismic prospecting // U.S. Patent 3,264,606. – 1966-08-02.
40. Cunningham A.B. Some alternate vibrator signals / A.B. Cunningham // *Geophysics*. – 1979. – vol. 44. – № 12. – P. 1901–1921.
41. Dean T. Establishing the limits of vibrator performance – experiments with pseudorandom sweeps / T. Dean // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*. – Society of Exploration Geophysicists, 2012. – SEG-2012-0221.1.
42. Dean T. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis acquisition / T. Dean, J. Tulett, D. Lane // *First Break*. – 2017.
43. Dean T. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis surveys / T. Dean // *Geophysical Prospecting*. – 2014. – vol. 62. – P. 50–74.
44. Denisov M.S. Optimization-based recursive filtering for separation of signal from harmonics in vibroseis / M.S. Denisov, A.A. Egorov, M.B. Shneerson // *Geophysical Prospecting*. – 2021. – vol. 69. – P. 779 – 798.
45. Duan H. Characteristic and processing method of SH-wave data generated by vibroseis source / H. Duan, P. Zhu, S. Peng // *Journal of Applied Geophysics*. – 2023. – P. 214.
46. Gold R. Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing (Corresp.) / R. Gold // *IEEE Transactions on Information Theory*. – 1967. – vol. 13. – № 4. – P. 619–621.
47. Goupillaud P.L. Signal Design in the “Vibroseis”® Technique / P.L. Goupillaud // *Geophysics*. – 1976. – vol. 41. – № 6. – P. 1291–1304.
48. Gustav Guanella. Improvements in radio direction finding system // Switzerland. Patent GB534036. – 1941-02-26.
49. Hampson G. Acquisition using simultaneous sources / G. Hampson, J. Stefani, F. Herkenhoff // *The Leading Edge*. – 2008. – vol. 27. – № 7. – P. 918–923.
50. Howe D. Independent simultaneous sweeping – a method to increase the productivity of land seismic crews / D. Howe, M. Foster, T. Allen, B. Taylor, I. Jack // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2008. – Society of Exploration Geophysicists. – 2008. – P. 2826–2830.
51. Howe D. Independent simultaneous sweeping / D. Howe, M. Foster, T. Allen, B. Taylor, I. Jack // *70th EAGE Conference and Exhibition Incorporating SPE EUROPEC 2008*. – European Association of Geoscientists & Engineers. – 2008. – P. cp-40-00048.
52. Howe D. Independent simultaneous sweeping in Libya full scale implementation and new developments / D. Howe, M. Foster, T. Allen, I. Jack, D. Buddery, A. Choi, R. Abma, T. Manning, M. Pfister // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – SEG. – 2009. – P. 109–111.
53. Iranpour K., Eriksson S., Hoerlin C. Generating sweep sequences // U.S. Patent 9,069,091. – 2015-6-30.

54. Jiang Z. An analysis on the simultaneous imaging of simultaneous source data / Z. Jiang, R. Abma // SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG. – 2010. – SEG-2010-3115.
55. Kasami T. Weight distribution formula for some class of cyclic codes [Техн. отч.]. – Coordinated Science Laboratory Report No. R-285, 1966.
56. Khasan R.E. Possibility and applicability of pseudo-random code functions in impulse-code seismic concentration to oil and gas seismology problem-solving research / R.E. Khasan, Y.P. Kostrygin // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2018. – P. 39–50.
57. Klauder J.R. The theory and design of chirp radars / J.R. Klauder, A.C. Price, S. Darlington, W. J. Albersheim // Bell System Technical Journal. – 1960. – vol. 39. – № 4. – P. 745–808.
58. Korotkov I. Increasing resolution and productivity of Vibroseis methods with enhanced simultaneous sweeps and cabled acquisition / I. Korotkov, A. Zhukov, R. Gafarov, I. Siraev // 84th EAGE Annual Conference & Exhibition. European Association of Geoscientists & Engineers. – 2023.
59. Korotkov I. Inverse Q sweep signal for broadband Vibroseis acquisition / I. Korotkov, A. Zhukov // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – SEG. – 2020. – P. 116–120.
60. Korotkov I., Zhukov A., Nekrasov I. Vibroseis Acquisition with Fully Controllable Sweep Signals Based on Borehole VSP Data Analysis / I. Korotkov, A. Zhukov, I. Nekrasov // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers. – 2022. – P. 1–5.
61. Krohn C.E. High fidelity vibratory seismic (HFVS) I-Enhanced data quality / C.E. Krohn, M.L. Johnson // 66th EAGE Conference & Exhibition. – European Association of Geoscientists & Engineers. 2004. – P. cp-3-00011.
62. Li Hongyuan. Research on the method design of pseudo-random sweep signals of controllable source: dissertation candidate of technical sciences: – Qingdao. – 2015. – 63 p.
63. Liang, Xiuwen. Nonlinear sweeping acquisition and parameter design of vibroseis / Xiuwen Liang // Petroleum Geophysical Exploration. – 1987. – vol. 05. – P. 559–568.
64. Lin Jun. Principle and application of electromagnetically driven vibrator seismic exploration / Jun Lin. – Science Press. – 2004. – 209 p.
65. Mahdad A. Separation of blended data by iterative estimation and subtraction of blending interference noise / A. Mahdad, P. Doulgeris, G. Blacquiere // GEOPHYSICS. – 2011. – vol. 76. – P. 9 – 17.
66. Mayne W.H. Method and apparatus for seismic exploration using nonlinear sweeps / W.H. Mayne, S. Zilkha // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1985. – vol. 78. – № 3. – P. 1153–1153.
67. Moerig R. Simultaneous shooting using cascaded sweeps / R. Moerig, F.J. Barr, D.L. Nyland // SEG International Exposition and Annual Meeting. – SEG. – 2002. – SEG-2002-0074.

68. Muir F. Seismic exploration using non-impulsive vibratory sources activated by stationary, Gaussian codes, and processing that results in distortion-free final records particularly useful in stratigraphic trap determination // US Patent 4,486,886. – 1984.
69. Muir F. Seismic exploration using non-impulsive vibratory sources activated by stationary, Gaussian codes, and processing the results in distortion-free final records particularly useful in urban areas // US Patent 4,601,022. – 1986.
70. Nasreddin H. The use of pseudorandom sweeps to reduce interference noise in simultaneous Vibroseis surveys / H. Nasreddin, T. Dean, K. Iranpour // ASEG Extended Abstracts 2012. – 2012. – P. 1–4.
71. Ni Yudong. Controllable seismic source exploration and acquisition technology / Yudong Ni. – Petroleum Industry Press. – 2014. – 159 p.
72. Ni Yudong. Research and application of new methods for controlled seismic source exploration: dissertation candidate of technical sciences: / Ni Yudong. – Bei Jing. – 2012. – 116 p.
73. Noorlandt R. A seismic vertical vibrator driven by linear synchronous motors / R. Noorlandt, G. Drijkoningen, J. Dams, R. Jenneskens // GEOPHYSICS. – 2015. – vol. 80. – P. 57–67.
74. Osipov V. Large-scale thematic geological mapping of Moscow area / V. Osipov // Engineering Geology for Society and Territory – Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation. – Springer. – 2015. – P. 11–16.
75. Öz Yilmaz. SEISMIC DATA ANALYSIS / Yilmaz. Öz. – Society of Exploration Geophysicists. – 2001. – 2065 p.
76. Postel J.J. V1: Implementation and application of single-vibrator acquisition / J.J. Postel, J. Meunier, T. Bianchi, R. Taylor // The Leading Edge. – 2008. – vol. 27. – № 5. – P. 604–608.
77. Qu Yingming. An efficient parallel forward modeling strategy for vibroseis / Yingming Qu, Zhenchun Li, Jianping Huang // China Geophysical Student Conference. – 2014a.
78. Qu Yingming. Study on characteristic noise suppression and aliasing data imaging of vibroseis: dissertation candidate of technical sciences: – Qingdao. – 2018. – 211 p.
79. Rieble W.C. Method and apparatus for continuous wave seismic prospecting // U.S. Patent 3,234,504. – 1966-02-08.
80. Ristow D. Vibroseis deconvolution / D. Ristow, D. Jurczyk // Geophysical Prospecting. – 1975. – vol. 23. – № 2. – P. 363–379.
81. Sallas J. Pseudorandom sweeps for simultaneous sourcing and low-frequency generation / J. Sallas, J. Gibson, P. Maxwell, F. Lin // Leading Edge. – 2011.
82. Sallas J.J., Corrigan D., Allen K.P. High fidelity vibratory source seismic method with source separation // U.S. Patent 5,721,710. – 1998-02-24.
83. Sarwate D.V. Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences / D.V. Sarwate,

- M.B. Pursley // Proceedings of the IEEE. – 1980. – vol. 68. – № 5. – P. 593–619.
84. Scholtz P. Pseudo-random sweeps for built-up area seismic surveys / P. Scholtz // The Leading Edge. – 2013. – vol. 32. – P. 276–282.
 85. Spitz S. Simultaneous source separation: A prediction-subtraction approach / S. Spitz, G. Hampson, A. Pica // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2008. – Society of Exploration Geophysicists. – 2008. – P. 2811–2815.
 86. Stewart J.L. A theory of active sonar detection / J.L. Stewart, E.C. Westerfield // Proceedings of the IRE. – 1959. – vol. 47. – № 5. – P. 872–881.
 87. Taner M.T. Seismic prospecting with random injected signal // U.S. Patent 3,697,938. – 1972-10-10.
 88. Tang Y. Least-squares migration/inversion of blended data / Y. Tang, B. Biondi // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2009. – Society of Exploration Geophysicists. – 2009. – P. 2859–2863.
 89. Tao Zhifei. Consideration of some issues in the design of vibrator sweep signals / Zhifei Tao // Geophysical Exploration Equipment. – 2001. – vol. 11. – № 1. – P. 9–15.
 90. Thomas J.W. Vibroseis as an impulsive seismic source – 3D field testing Permian Basin Texas / J.W. Thomas, D.M. Jurick, D. Osten // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. – Society of Exploration Geophysicists. – 2012. – P. 1–5.
 91. **Wang R.** Full-wave vibroseis acquisition with various controllable sweep signals emitted by lightweight electric vibrator / R. Wang, I. Korotkov, A. Zhukov // 85th EAGE Annual Conference & Exhibition. – 2024. – P. 1–5.
 92. Wang R.Q. Forward modeling research for seismic exploration of Tarim area / R.Q. Wang, L.L. Li, H.J. Li // Chinese Journal of Geophysics. – 2010. – vol. 53. – № 8. – P. 1875–1882.
 93. Wang Zhongren. Method of design vibroseis signal based on ternary pseudo-random coding / Zhongren Wang, Dandan Fan, Jiangao, Xiangnan Liu // Petroleum Geophysical Exploration. – 2009. – vol. 44. – № 5. – P. 534–536.
 94. Wang Zhongren. Numerical simulation of seismic response of nonlinear sweeping signals / Zhongren Wang, Zubin Chen, Lin Xing Zhang, Zhiyuan Chai // Progress in Geophysics. – 2006. – № 3.
 95. Wang, Zhongren. Seismic response of pseudo-random coded sweep signals / Wang, Zhongren, and Chiyuan. // Progress in Geophysics. – 2007. – vol. 22. – № 6. – P. 1736–1739.
 96. Wapenaar K. Deblending by direct inversion / K. Wapenaar, J. van der Neut, J. Thorbecke // Geophysics. – 2012. – vol. 77. – № 3. – P. 9–12.
 97. Ward R.M. Phase encoding of vibroseis signals for simultaneous multisource acquisition / R.M. Ward, R.H. Brune, A. Ross, L.H. Kumamoto // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 1990.

- Society of Exploration Geophysicists. – 1990. – P. 938–941.
98. Werner H. Combisweep – a contribution to sweep techniques / H. Werner, T. Krey // *Geophysical Prospecting*. – 1979. – vol. 27. – № 1. – P. 78–105.
 99. Wong J. Field testing of multiple simultaneous vibrator sources controlled by m-sequences / J. Wong, D. Langton // *SEG International Exposition and Annual Meeting*. – SEG. – 2014. – SEG-2014-0802.
 100. Wong J. Field testing of multiple simultaneous vibrator sources controlled by m-sequences / J. Wong, D. Langton // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – SEG, 2014. – P. 173–177.
 101. Yang Xuan. Simulation and research of three-element pseudo-random sweep signal for vibrator / Xuan Yang, Lingyun Wu, Yicheng Liu // *Journal of Oil and Gas*. – 2011. – vol. 33. – № 6. – P. 74–76.
 102. Yang Zhichao. Research on key technologies of electromagnetic seismic source: dissertation candidate of technical sciences: – Jilin University, 2015. – 128 p.
 103. Zhukov A. Simultaneous pseudo-random shuffle-sweep generation and increased seismic data acquisition productivity / A. Zhukov, I. Korotkov, E. Sidenko, I. Nekrasov, P. Gridin, T. Galikeev // *SEG International Exposition and Annual Meeting*. – SEG. – 2017. – P. SEG-2017.
 104. Zhukov A. The adaptive vibroseis technology: Hardware, software, and outcomes / A. Zhukov // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – SEG. – 2013. – P. 249–253.
 105. Zu S. Shot-domain deblending using least-squares inversion / S. Zu, H. Zhou, Q. Li, H. Chen, Q. Zhang, W. Mao, Y. Chen // *GEOPHYSICS*. – 2017. – vol. 82. – P. V241–V256.