

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

на правах рукописи



Гончаров Алексей Алексеевич

**ПРИМЕНЕНИЕ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ (ШУМОПОДОБНЫХ)  
СИГНАЛОВ ИСТОЧНИКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ И СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

Специальность 1.6.9. «Геофизика»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат физ.-мат. наук Д.А. Алексеев

Москва – 2025

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. СВЕРТОЧНАЯ МОДЕЛЬ ОТКЛИКА И СИГНАЛЫ ИСТОЧНИКА В МЕТОДАХ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ И ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ.....</b>	<b>18</b>
§1.1 Основные сведения о морской технологии зондирования становлением поля с буксируемой диполь-дипольной установкой .....	18
§1.2 Виды переходных характеристик в импульсной электроразведке .....	22
§1.3 Основные сведения о вибрационной сейсморазведке .....	25
<b>ГЛАВА 2. ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ.....</b>	<b>31</b>
§2.1 Основные сведения об использовании псевдослучайных сигналов в геофизических измерительных системах .....	31
§2.2 Подходы к оценке переходной характеристики (отклика) среды .....	34
§2.3 Принципы использования псевдослучайных кодовых последовательностей в качестве управляющего сигнала в системах вибрационной сейсморазведки .....	40
<b>ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ (ШУМОПОДОБНЫХ) СИГНАЛОВ В МОРСКОЙ БУКСИРУЕМОЙ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ.....</b>	<b>46</b>
§3.1 Проблема помехоподавления при регистрации данных ЗСБ с использованием морской буксируемой диполь-дипольной установки .....	46
§3.2 Анализ характерных шумов и полезного сигнала в условиях морского зондирования становлением поля на основе экспериментальных данных .	56
§3.3 Сравнительный анализ эффективности помехоподавления в режимах накопления и ШПС в условиях морского зондирования становлением поля	62
§3.4 Сравнительный анализ эффективности применения периодических сигналов, модулированных псевдослучайным кодом.....	70
§3.5 Основные выводы .....	93
<b>ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ (ШУМОПОДОБНЫХ) СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ.....</b>	<b>95</b>
§4.1 Моделирование синтетических импульсных переходных характеристик (1D) .....	95
§4.2 Анализ помехоподавления в рамках 1D моделирования вибросейсмических данных при зашумлении синтетическим Гауссовским шумом .....	98

§4.3 Анализ помехоподавления в рамках 1D моделирования вибросейсмических данных при зашумлении нескоррелированным сейсмическим сигналом.	107
§4.4 Анализ эффективности применения псевдослучайных свип-сигналов на основе 2D моделирования вибросейсмических данных на примере модели мерзлых грунтов для района г. Салехард .....	113
§4.5 Основные выводы .....	128
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>130</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>133</b>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Работа посвящена модельному анализу возможностей применения псевдослучайных кодовых последовательностей в качестве управляющего сигнала в геофизических измерительных системах. В частности, рассматривается использование данного подхода в системах зондирования становлением поля в ближней зоне применительно к морским наблюдениям в условиях шельфовых морей Российской Арктики, а также в системах вибрационной сейсморазведки при решении инженерно-геологических задач картирования многолетнемерзлых пород на территории Ямало-Ненецкого автономного округа в условиях городской застройки.

### **Актуальность работы**

Эффективность использования геофизических методов при решении различных геологических задач в значительной степени определяется правильным выбором подходящих методик наблюдений и интерпретации полученных данных. Ключевым параметром систем регистрации и обработки данных является их помехозащищенность – т.е., способность обеспечивать достаточное (для целей последующей интерпретации) значение отношения сигнал/шум в присутствии помех, типичных для тех или иных условий геофизической съемки. В настоящей работе с единых позиций рассматривается проблема подавления нерегулярных помех в двух типах геофизических систем наблюдения – морской импульсной электроразведки и вибрационной сейсморазведки – применительно к условиям, характерным для задач картирования многолетнемерзлых пород.

Эффективность использования геофизических методов при решении различных геологических задач в значительной степени определяется правильным выбором подходящих методик наблюдений и интерпретации полученных данных. Одним из важных эксплуатационных параметров аппаратуры регистрации и последующей обработки является устойчивость к внешним помехам — то есть способность системы сохранять приемлемый уровень отношения сигнал/шум, необходимый для достоверной интерпретации, даже в условиях фоновых и

индустриальных помех, типичных для конкретных полевых условий. В данной работе с единых методологических позиций рассматривается задача снижения нерегулярных шумов для двух классов геофизических технологий — морской импульсной электроразведки и вибрационной сейсморазведки — с учётом их применения в задачах изучения распространения многолетнемерзлых пород.

Импульсные методы электромагнитного (ЭМ) зондирования, в частности метод становления поля (ЗС) [Светов, 2008; Кауфман и др., 2016; Nabighian and Masnae, 1991], успешно применяются в морской геофизике [Петров, 2000; Barsukov and Fainberg, 2014] для исследования мерзлотных образований в пределах шельфа Восточной Сибири [Shakhova et al., 2017; Кошурников, 2020; Krylov et al., 2023]. Вместе с тем, данный подход демонстрирует сравнительно низкую устойчивость к шумовым воздействиям, что объясняется особенностями генерации и регистрации сигналов в условиях морской буксируемой аппаратуры, работающей по схеме «диполь–диполь». Несмотря на это, применение подобных систем в целях изучения осадочных толщ и многолетнемерзлых пород на мелководных участках Арктического шельфа [Shakhova et al., 2017] остаётся технически оправданным ввиду высокой оперативности при выполнении измерений на ходу, простоты реализации аппаратуры и достаточной информативности данных.

Ключевым ограничением технологии выступает необходимость регистрации слабого отклика в поздние моменты времени, когда значения кривой становления резко уменьшаются и оказываются подвержены влиянию шумов, что снижает достоверность интерпретации на значительных глубинах. Как правило, для повышения точности применяется метод накопления — многократное измерение переходного отклика для серии импульсов длительностью несколько секунд с последующим усреднением по всем реализациям [Giannino and Leucci, 2021].

Для увеличения отношения сигнал/шум в системах ЗС обычно используют более мощные генераторы и увеличивают число накоплений. Однако в реальных условиях такие меры имеют ограничения: увеличение мощности связано с техническими и энергетическими лимитами, а также с возможными искажениями

формы импульсов в мощных цепях, тогда как многократное накопление становится затруднительным при непрерывном движении судна во время морских съемок.

Одним из возможных альтернативных решений является использование источников с псевдослучайной (шумоподобной) модуляцией (ШПС) [Варакин, 1985; Zepernick, Finger, 2005], что рассматривалось ранее в ряде исследований применительно к ЭМ зондированию [Duncan et al., 1980; Helwing, 1999; Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012; Ильичев, Бобровский, 2014; Великин, Великин, 2016]. Такие сигналы характеризуются широким спектром и статистическими характеристиками, приближенными к гауссовскому шуму, что обеспечивает им высокую устойчивость к помехам. В результате, за последние десятилетия они получили широкое распространение в радиосвязи, радиолокации и радиоастрономии.

В частности, в исследованиях [Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012] показано, что при использовании наземной ЗС-системы с соосными петлевыми антеннами ШПС-сигналы обеспечивают в 3–5 раз более эффективное подавление шумов по сравнению с традиционным накоплением, при равных энергетических и временных затратах, несмотря на лишь незначительное увеличение продолжительности информативной части кривой становления.

Что касается морского варианта, специфика сигнала здесь заключается в более медленном затухании на поздних стадиях, что может способствовать дополнительному росту отношения сигнал/шум при использовании ШПС по сравнению с петлевой конфигурацией [Алексеев и др., 2019; Гончаров и др., 2019; 2021]. Следовательно, модернизация ЗС-технологии в морских условиях представляется актуальной задачей, прежде всего в связи с ограниченной помехозащищённостью традиционной схемы, обусловленной ограниченным временем зондирования на каждой точке трассы и характером регистрации сигнала.

Аналогичные проблемы и подходы являются актуальными и применительно к системам вибрационной сейсморазведки, реализующим повышение качества регистрации высокочастотных и низкоамплитудных сейсмических сигналов на

фоне волн-помех за счет применения длительного сейсмического воздействия вместо импульсного [Вибрационная..., 1990]. Востребованность применения таких систем связана, в том числе, с задачами изучения процессов деградации мерзлоты под объектами капитального строительства [Никифорова и Коннов, 2021], когда проведение исследований осложняется наличием множества помех, таких как линии электропередач и металлические объекты в земле, что делает практически невозможной интерпретацию данных электроразведки [Кузин и Торхов, 2023], а обработка сейсмических данных затруднена вследствие влияния фонового сейсмического шума, связанного с дорожной инфраструктурой и свайными полями.

Чаще всего в качестве свип-сигналов вибрационных систем используют частотно-модулированные (ЧМ) сигналы, мгновенная частота которых непрерывно изменяется во времени по линейному закону, обычно принимая значения в промежутке от первых десятков до 100-200 Гц [Вибрационная..., 1990]. Основной подход к обработке вибросейсмических данных предполагает построение коррелограмм между свип-сигналом источника и принятыми сейсмотрассами [Вибрационная..., 1990; Sheriff, Geldart, 1995]. Соответственно, для успешного выделения отдельных (не накладывающихся друг на друга во времени) отражений из наблюдаемого сигнала сложной формы необходимо, чтобы автокорреляционная функция (АКФ) свип-сигнала имела вид, достаточно близкий к узкому (дельта-подобному) импульсу. При этом, в ряде работ отмечается, что качество выделения индивидуальных отражений на коррелограммах не всегда оказывается достаточным для последующей интерпретации [Vedanti et al., 2021]. Переход от частотно-модулированных свип-сигналов к псевдослучайным последовательностям импульсов механической нагрузки позволяет существенно улучшить эту характеристику, что обусловлено узостью главного лепестка АКФ псевдослучайных сигналов, а также малой амплитудой и быстрым затуханием боковых лепестков [Dean, 2014].

Учитывая ряд известных полезных свойств псевдослучайных сигналов источника (широкополосность, узость автокорреляционной функции), и

предшествующие, но весьма ограниченные попытки их опробования в ряде геофизических методов, целесообразно дальнейшее изучение эффективности использования подобных свип-сигналов в комплексах импульсной электроразведки и вибрационной сейсморазведки.

### **Степень разработанности темы исследования**

Степень разработанности темы исследования. Псевдослучайные (шумоподобные) сигналы достаточно давно получили распространение в различных технических областях, прежде всего, в системах связи, локации и навигации [Варакин, 1985; Ипатов, 1992; Zepernick, Finger, 2005]. Идея использования шумоподобных последовательностей импульсов в системах электромагнитного зондирования уже рассматривалась рядом авторов [Helwing, 1999; Светов и др., 2012; Ильичев и Бобровский, 2014; Великин и Великин, 2016] применительно к наземной ЗС-установке типа “петля в петле”, где было показано некоторое преимущество ШПС перед стандартно-используемыми сигналами накопления. В работах [Алексеев и др., 2019; Гончаров и др., 2019; 2021, Кошурников и др., 2024] изучалась эффективность применения ШПС с прямоугольными импульсами в морской буксируемой установке, и также было показано определенное преимущество такого подхода перед накоплением в условиях одинаковой продолжительности зондирования. В целом, переход к морской диполь-дипольной установке позволяет рассчитывать на улучшение соотношения сигнал/шум в режиме ШПС по сравнению с установкой “петля в петле” в силу более медленного убывания кривой установления поля, но требует дальнейшего анализа.

Попытки изучить возможность применения ШПС в сейсморазведке предпринимались различными авторами, начиная со второй половины 20 века [Wischmeyer, 1966]. Развитие вычислительной техники позволило реализовать различные подходы к генерации ШПС, что дало новый импульс внедрению ШПС в прикладную сейсморазведку и обеспечило гибкость при выборе сигнала под конкретные задачи [Sallas et al., 2008]. В работе [Sun et al., 2009] проведено сравнение ряда двоичных и троичных ШПС свип-сигналов, а также реализована

генерация троичных сигналов АКФ с наиболее оптимальными АКФ. В статье [She, 2011] предложен метод построения ШПС-свипа на основе генератора последовательностей максимальной длины и полосового фильтра, обеспечивающего достаточно хорошую локализацию отражений. Авторы исследований [Scholtz, 2012; 2013] решали задачу подбора таких псевдослучайных свип-сигналов, которые обеспечили бы оптимальность АКФ и минимизацию сейсмического воздействия различные объекты инфраструктуры (на территориях с застройкой). Как отмечается в [Dean, 2014], ШПС хорошо зарекомендовали себя в условиях синхронного возбуждения, при котором несколько вибраторов работают одновременно. В таких сценариях применение ортогональных ШПС позволяет эффективно разделять сигналы от различных источников на этапе обработки, значительно снижая интерференционный шум и повышая разрешающую способность по глубине. [Жуков и др., 2017] также исследовали возбуждение псевдослучайных свип-сигналов в одновременном режиме и отметили повышения качества разделения зарегистрированных сигналов. [Хасан и Кострыгин, 2018] рассмотрели ряд ШПС, а также сигналов с линейным изменением периода следования импульсов, показав, что спектры главных максимумов АКФ ШПС к спектрам единичных импульсов, используемых для построения этих последовательностей. В то же время, авторами отмечается, что такие сигналы характеризуются повышенным уровнем помех на коррелограммах, что, видимо, требует дальнейшего исследования.

### **Объект исследования**

В качестве объекта исследования выступает помехозащищенность геофизических систем зондирования становлением поля и вибрационной сейсморазведки, основанных на применении псевдослучайных кодовых последовательностей в роли сигналов источника (управляющих свип-сигналов). Исследование проводится на основе синтетических моделей, отражающих характерные геологические особенности Арктического шельфа России и грунтов оснований зданий и сооружений города Салехард (ЯНАО), а также

экспериментально-зарегистрированных шумов, полученных в рамках геофизических работ в названных районах.

### **Цель исследования**

Повышении эффективности помехоподавления в системах морской импульсной электроразведки и вибрационной сейсморазведки за счет применения возбуждающих свип-сигналов в форме псевдослучайных (шумоподобных) последовательностей (ПСП, ШПС).

### **Основные задачи**

- Теоретическая оценка эффективности использования псевдослучайных последовательностей импульсов тока в системе малоглубинной морской электроразведки методом становлением поля на основе математического моделирования и доступных экспериментальных данных
- Теоретическая оценка эффективности использования псевдослучайных последовательностей импульсов механической нагрузки в системах вибрационной сейсморазведки на основе математического моделирования и доступных экспериментальных данных
- Разработка алгоритмов и программного обеспечения для обработки данных импульсной электроразведки и вибрационной сейсморазведки, полученных в режиме псевдослучайных (шумоподобных) возбуждающих сигналов

### **Научная новизна работы**

В рамках работы впервые совместно проанализированы типичный полезный сигнал, а также характеристики электромагнитных и сейсмических шумов, соответствующих условиям шельфа Арктики и районам городской застройки на территориях с нестабильной мерзлотой, соответственно.

С использованием вышеупомянутых характеристик впервые получены оценки помехоподавления в режиме зондирования становлением поля с использованием морской буксируемой диполь-дипольной установки и псевдослучайных (шумоподобных) последовательностей импульсов тока в

геоэлектрических условиях Арктического шельфа, включая типичные кривые полезного сигнала и ряды шума.

Кроме того, впервые исследована возможность использования шумоподобных свип-сигналов в качестве управляющих сигналов для вибрационной сейсморазведки при решении инженерно-геологических задач в условиях городской застройки арктических территорий России, с учетом типичных характеристик полезного сигнала и шума.

### **Практическая и теоретическая значимость**

Теоретическая значимость настоящего исследования заключается в развитии научных представлений о применении шумоподобных сигналов в геофизике, а также в уточнении теоретических основ их использования для повышения помехоустойчивости и разрешающей способности при зондировании многолетнемерзлых пород.

Практическая значимость определяется вкладом работы в повышение эффективности существующих геофизических методов картирования многолетнемерзлых пород на арктических территориях Российской Федерации за счёт внедрения шумоподобных сигналов и соответствующих алгоритмов обработки.

Применение шумоподобных свип-сигналов различного типа в морских буксируемых установках ЭМ-зондирования позволит значительно улучшить качество получаемых данных, что, в свою очередь, повысит глубинность и разрешающую способность метода и позволит получать более точные геоэлектрические модели в задачах картирования подводной мерзлоты и разведки месторождений полезных ископаемых в условиях шельфа.

Аналогичный вклад ожидается в связи с применением шумоподобных свип-сигналов в системах вибрационной сейсморазведки, где они потенциально могут обеспечить улучшенное подавление нерегулярных волн-помех как в инженерно-геологических приложениях (выявление зон проставивания многолетнемерзлых пород под зданиями и сооружениями в на арктических территориях), так и в задачах поиска/мониторинга нефтегазовых месторождений.

## Методология и методы исследования

В основе работы лежит моделирование синтетического полезного сигнала и наложение экспериментально-зарегистрированного шума с последующим восстановлением полезного сигнала с использованием алгоритмов деконволюции и кросс-корреляции. Для достижения целей работы и решения поставленных задач был использован ряд ранее апробированных методов численного моделирования, включая одномерную прямую задачу ЭМ-зондирования, основанную на расчете преобразования Ханкеля [Key, 2009], а также конечно-элементный алгоритм полноволнового моделирования сейсмических волн (<https://www.devitoproject.org>). Эти методы позволили обеспечить точное моделирование синтетического полезного сигнала применительно к задачам зондирования становлением поля и вибрационной сейсморазведки.

Для обработки полученных сигналов применялись методы сглаживающей фильтрации и интерполяции, что позволило повысить точность анализа и устранить возможные артефакты.

Расчет синтетических кривых становления поля, соответствующих геоэлектрическим условиям Арктического шельфа моря Лаптевых, был выполнен с использованием модифицированной версии свободно распространяемого программного обеспечения "DIPOLE 1D", предназначенного для моделирования кривых частотного зондирования в 1D-моделях среды, включая конфигурации с погруженным в среду источником поля с последующим преобразованием во временную область [Key, 2009; Московская, 2001; Пушкарев, 2006; Krylov, 2023]. Для оценки типичной кривой становления поля (переходной характеристики) был выполнен анализ большого набора данных зондирования становлением поля в ближней зоне, полученных в ходе рейса АМК-82 [Krylov, 2023].

Анализ помехоустойчивости при использовании псевдослучайных сигналов в морской системе зондирования становлением поля в ближней зоне проводился путем расчета свертки псевдослучайных сигналов источника с переходной характеристикой среды (задаваемой на основе модельных данных, либо оцениваемой из реальных экспериментальных записей поля), с последующим

добавлением реального шумового фона, восстановленного из данных зондирования (рейс АМК-82). После этого применялся метод деконволюции для восстановления переходной характеристики, которая затем сравнивалась с исходной для вычисления относительных погрешностей.

Для моделирования данных вибрационной сейсморазведки были построены одномерная и двухмерная скоростные модели среды с параметрами, типичными для условий развития вечной мерзлоты в районе г. Салехард. Двухмерное моделирование выполнялось с использованием пакета библиотек Python Devito, реализующего решение уравнений Ламе методом конечных разностей. Этот подход обеспечил высокую точность полноволнового сейсмического моделирования.

Оценка помехоподавления в системе вибрационной сейсморазведки, использующей псевдослучайные сигналы импульсов механической нагрузки осуществлялась путем сравнения с режим стандартного частотно-модулированного свип-сигнала. Построенные виброграммы были зашумлены сигналом, выделенным из записей сейсмического шума, предоставленных ГАУ ЯНАО "Научный центр изучения Арктики", и затем обрабатывались с применением методов деконволюции и кросс-корреляции для получения сейсмограмм/коррелограмм с оценкой их погрешности.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Основные помехи, вносящие искажения в записи зондирования становлением поля, регистрируемые с использованием буксируемой диполь-дипольной электроразведочной установки в условиях шельфа моря Лаптевых, имеют частотный диапазон от сотых долей до первых единиц Гц.
2. Использование псевдослучайных (шумоподобных) последовательностей импульсов тока в морской буксируемой системе малоглубинной импульсной электроразведки позволяет существенно улучшить помехоподавление и расширить неискаженный шумами диапазон переходной характеристики по сравнению с традиционно-используемым режимом накопления.

3. Использование свип-сигналов, основанных на шумоподобных последовательностях импульсов механической нагрузки в системах вибрационной сейсморазведки позволяет улучшить подавление нескоррелированных волн-помех и повысить детальность получаемых сейсмограмм по сравнению с традиционно-используемыми свип-сигналами с линейной частотной модуляцией.
4. Выбор конкретного вида псевдослучайного сигнала источника целесообразно осуществлять, исходя из минимизации отношения спектров шума и сигнала источника в целевом диапазоне частот на основе предварительного анализа свойств шума в районе работ.

### **Обоснованность и достоверность результатов и выводов**

**Достоверность научных положений**, изложенных в диссертации, подтверждается применением стандартных алгоритмов математического моделирования и анализа экспериментальных данных.

### **Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждена:**

- корректностью применения апробированного в научной практике исследовательского и аналитического аппарата;
- подробными расчетами полученных выводов и закономерностей;
- обсуждением результатов исследования на международных и всероссийских научных конференциях;
- публикациями результатов исследования в рецензируемых научных изданиях.

### **Апробация:**

Основные положения доложены на всероссийских конференциях (5), а также на (2) научных семинарах:

1. VIII Международная геолого-геофизическая конференция и выставка «ГеоЕвразия-2025. Геологоразведочные технологии - наука и бизнес», МГРИ (г. Москва, 2025).
2. 67-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный 2025).

3. Семинар «Геолого-геофизический мониторинг литосферы Тянь-Шаня», организованный Научной станцией РАН в г. Бишкеке совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта (г. Бишкек, 2025)
4. 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный 2023).
5. 64-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный 2021).
6. VIII Всероссийская школа-семинар по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Москва 2021).
7. Международная Научно – практическая Конференция “Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике” (ЯНАО, г. Салехард Правительство Ямало-Ненецкого автономного округа, 2021).

### **Публикации**

Соискателем опубликовано 4 научных статьи, из них 3 — в журналах, рекомендованных ВАК, 2 — в изданиях, индексируемых в базах WoS и Scopus, и 1 — в журнале, входящем в базу цитирования CrossRef:

1. Гончаров А.А., Алексеев Д.А., Кошурников А.В, Гунар А.Ю, Семилетов И. П., Пушкарев П.Ю. Применение псевдослучайных кодовых последовательностей для повышения эффективности зондирования становлением поля в ближней зоне на Арктическом шельфе // Физика Земли, 2022, №5, с. 158–170.
2. Алексеев Д.А, Кудинов Д.С., Потылицын В.С., Гончаров А.А. Модельный анализ эффективности псевдослучайных кодовых последовательностей для возбуждения поля упругих колебаний в системах вибрационной сейсморазведки // Вестник Российской Академии Естественных Наук, 2023, Т. 23, № 4, с.139-151, DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-4-139-151.
3. D. Alekseev, A. Goncharov, S. Tikhotsky, S. Fomichev, S. Golovin and A. Razin. Improving the efficiency of seismic exploration systems based on the use of pseudo-random sweeps: mathematical modeling // International Journal of Science

and Research archive (IJSRA), 2024, 13(02), 2206–2214. Article DOI: 10.30574/ijsra.2024.13.2.2345.

4. Алексеев Д.А., Кошурников А.В., Пушкарев П.Ю., Балихин Е.И., Гунар А.Ю., Гончаров А.А. Оценка возможностей применения свип-сигналов в морской буксируемой системе импульсной электроразведки на основе математического моделирования // Сейсмические приборы. 2024, Т. 60, № 4, с. 44-61. DOI 10.21455/si2024.4-3.

### **Личный вклад**

Моделирование синтетического полезного сигнала, имитирующего данные морской буксируемой электроразведочной установки типа диполь-диполь, а также данные вибрационной сейсморазведки и (с использованием собственных алгоритмов и программного кода) провел корреляционную обработку и деконволюцию зашумленных наборов данных для оценки эффективности помехоподавления. Автор также принимал активное участие в обработке данных зондирования становлением поля, полученных в ходе морской экспедиции, проведенной в 2020 г. института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и непосредственно участвовал в полевых инженерно-геологических исследованиях в г. Салехард (Ямало-Ненецкий автономный округ) совместно с сотрудниками из ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики». Полученные данные использовались автором для оценки возможностей предлагаемого подхода.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 49 наименований, изложена на 135 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 6 таблиц.

### **Благодарности:**

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, к.ф.-м.н. Д.А. Алексееву, за неоценимую помощь, постоянную поддержку, конструктивные советы и чуткое отношение на всех этапах выполнения данной работы. Особая признательность выражается Федеральному государственному

автономному образовательному учреждению высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» за предоставленную возможность проведения исследования и ценный опыт научной работы.

## ГЛАВА 1. СВЕРТОЧНАЯ МОДЕЛЬ ОТКЛИКА И СИГНАЛЫ ИСТОЧНИКА В МЕТОДАХ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ И ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

### §1.1 Основные сведения о морской технологии зондирования становлением поля с буксируемой диполь-дипольной установкой

Метод зондирования становлением поля (ЗС), являющийся одним из индукционных электромагнитных (ЭМ) геофизических методов, и нашедший широкое применение при решении задач разведочной и инженерной геофизики, в том числе, морских геоэлектрических исследований, основан на регистрации переходного процесса, индуцируемого в проводящей среде вследствие мгновенного (достаточно быстрого) изменения тока в источнике, создающем первичное ЭМ-поле [Светов, 2008; Кауфман и др., 2016; Nabighian and Macnae, 1991].

Теоретической базой метода служит система уравнений Максвелла в квазистационарном приближении, описывающая диффузию индуцированных токов в геоэлектрически-неоднородной среде. Регистрируемый отклик, представляющий собой временную зависимость спада напряжённости той или иной компоненты ЭМ поля, несёт информацию о пространственном распределении электрических свойств исследуемого разреза.

Одним из преимуществ ЗС является высокая чувствительность процесса становлением поля (т.е., отклика изучаемой среды) к изменению электрических параметров разреза [Светов, 2008]. Другой важный аспект состоит в наличии данной чувствительности при малых разносах источник-приемник. В связи с этим наибольшее распространение получила модификация метода ЗС, реализуемая в т.н. ближней зоне (ЗСБ), что дает возможность проводить регистрацию поля в непосредственной близости от источника. Это обеспечивает высокую локальность наблюдений и, соответственно, повышает точность геологической интерпретации.

В классическом варианте ЗСБ производится регистрация отклика среды на ступенчатое выключение тока в генераторной установке (рис. 1.1а), т.е., измерение временного спада одной из компонент электромагнитного поля (рис. 1.1б) с

помощью приемного датчика того или иного типа (петля, индукционный датчик, электрический диполь) [Giannino and Leucci, 2021].

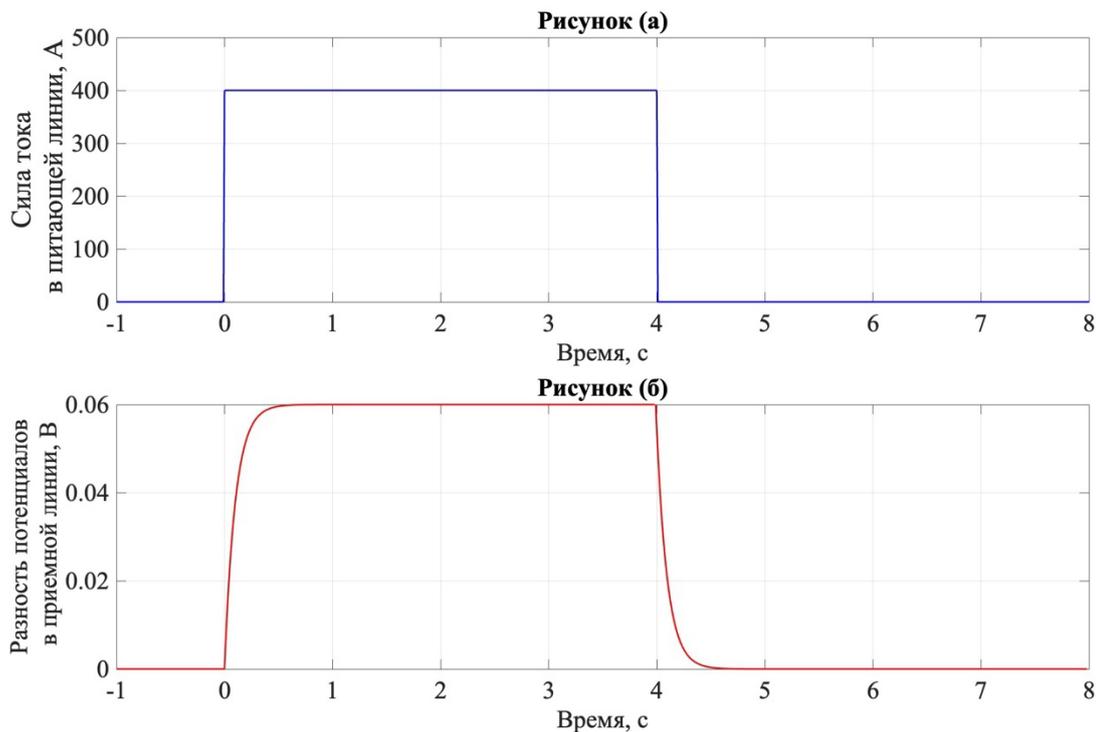


Рисунок 1.1 – Пример идеального импульса тока в генераторной линии (а) и соответствующий ему сигнал в приемной линии (б).

При переключении тока в источнике электромагнитное поле возникает не мгновенно, а асимптотически выходит через стадию быстрого нарастания (при включении тока) на режим постоянного тока (при достаточно большой длительности импульса). При выключении тока, напротив, наблюдается спад, скорость которого определяется распределением удельного электрического сопротивления в изучаемом разрезе. Таким образом, основным объектом интерпретации в геоэлектрических исследованиях являются регистрируемые после выключения тока временные зависимости той или иной компоненты ЭМ-поля, называемые также кривыми становления поля.

Важно отметить, что амплитуда, скорость убывания и форма кривой становления поля зависит от длительности прямоугольного импульса возбуждения. На рисунке 1.2 приводится сопоставление кривых становления поля, смоделированных для соосной компоненты электрического поля, создаваемого

диполь-дипольной установкой на поверхности двухслойной среды при различной длительности импульса возбуждения.

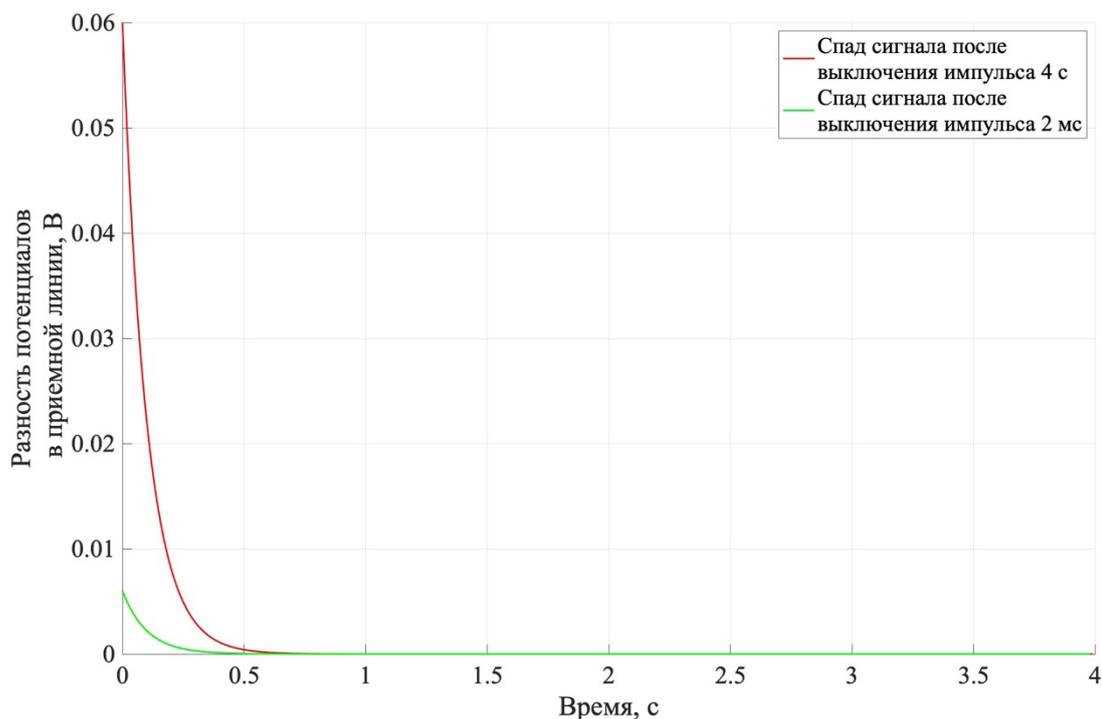


Рисунок 1.2 – Зависимость напряжения в приемной линии от времени: красная кривая – спад напряжения после выключения импульса длительностью 4 с; зеленая кривая – спад напряжения после выключения импульса длительностью 2 мс.

Поскольку амплитуда сигнала может изменяться на несколько порядков в ходе одного измерения, целесообразно использовать двойной логарифмический масштаб, при котором как временная ось, так и ось амплитуд представлены в логарифмическом виде. Такой подход позволяет более наглядно выявлять характерные особенности кривых — наклоны, перегибы, области экспоненциального и степенного поведения — и проводить точный сравнительный анализ между различными сигналами. Пример таких зависимостей, отображающих кривые становления поля (так называемые переходные характеристики среды), приведён на рисунке 1.3.

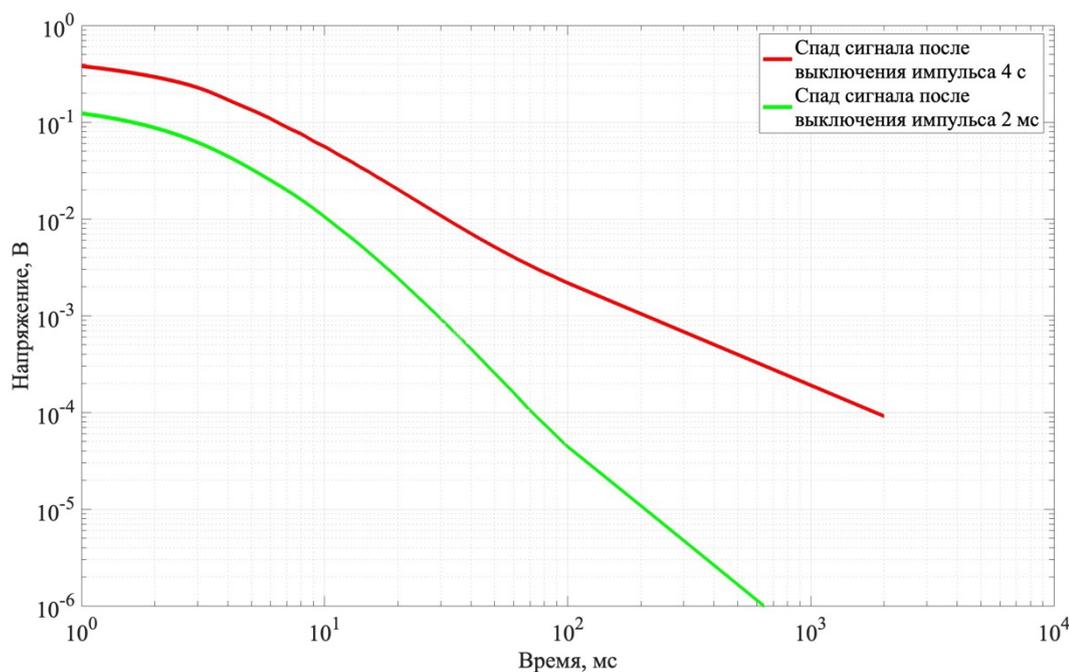


Рисунок 1.3 – Зависимость логарифма напряжения в приемной линии от логарифма времени: красная кривая – после выключения импульса длительностью 4 с; синяя кривая – после выключения импульса длительностью 2 мс

Закон убывания кривой становления для диполь-дипольной установки, приближающийся на поздних временах к  $t^{-\frac{3}{2}}$  для длительных и  $t^{-\frac{5}{2}}$  для коротких импульсов, является отражением поведения поля в ближней зоне источника в условиях геоэлектрического разреза с высокопроводящим верхним слоем. Регистрация кривых становления поля предполагает необходимость обеспечить достаточный уровень точности, позволяющих выделить особенности их формы, связанные с электрическими параметрами изучаемого разреза, в том числе, в области поздних времен, определяющей глубину зондирования.

В контексте последующего анализа сигналов зондирования и кривых становления поля, ниже приведем основные сведения, касающиеся преобразования возбуждающего сигнала в линейной системе “среда-установка”.

## §1.2 Виды переходных характеристик в импульсной электроразведке

В контексте исследуемых в настоящей работе вопросов, далее мы ограничимся рассмотрением поведения соосной компоненты электрического поля, предполагая, что первичное поле создается горизонтальной питающей линией, располагающейся на поверхности или в толще водного слоя [Krylov et al., 2023]. Имея это в виду, всюду далее под термином “отклик” мы будем понимать именно эту компоненту, если иное не оговорено дополнительно.

В общем же случае, вследствие линейности уравнений Максвелла относительно интенсивности сторонних источников поля, отклик изучаемой среды  $s(r, t)$  в точке  $r$  в момент времени  $t$  на произвольное стороннее воздействие, задаваемое плотностью стороннего тока  $j^{ext}$ , распределенного в пределах некоторой области пространства  $V'(r')$  и меняющегося со временем  $\tau$ , может быть представлен в виде соотношения (1.1) [Светов, 1991]:

$$s(r, t) = \int_{V'} \int_{-\infty}^{+\infty} G(r, t, r', \tau) \cdot j^{ext}(r', \tau) d\tau dV'. \quad (1.1)$$

Здесь  $G(r, t, r', \tau)$  – функция Грина среды для данной компоненты ЭМ-поля, зависящая от геоэлектрических параметров среды и геометрической конфигурации системы наблюдения, но независящая от приложенного стороннего воздействия. Помимо выражаемой соотношением (1.1) линейности, мы также ограничимся рассмотрением только стационарных систем, функция Грина которых сводится к импульсной переходной характеристике  $h(t)$ , что можно (опуская пространственные переменные) записать как:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t - \tau) \cdot I(\tau) d\tau. \quad (1.2)$$

Иными словами, отклик  $s(t)$  в точке наблюдения формируется в результате свертки переменной во времени амплитуды тока в питающей линии  $I(t)$  с

импульсной переходной характеристикой (ИПХ) среды  $h(t)$ , представляющей собой реакцию системы на дельта-функцию Дирака.

При переходе в частотную область, согласно теореме о свертке, это преобразование эквивалентно умножению спектра входного воздействия  $\tilde{I}(\omega)$  на частотную характеристику системы  $\tilde{h}(\omega)$ :

$$S(\omega) = \tilde{I}(\omega) \cdot \tilde{h}(\omega), \quad (1.3)$$

где  $\omega$  – круговая частота, а

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{h}(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \quad (1.4)$$

С точки зрения практической реализации предпочтительнее рассматривать реакцию системы не на дельта-функцию, а на функцию Хэвисайда (ступень выключения). Соответственно, вместо измерения и анализа импульсной характеристики  $h(t)$  в системах ЗС обычно регистрируют и интерпретируют переходную характеристику  $H(t)$ :

$$H(t) = 1 - \int_0^t h(\tau) d\tau \quad (1.5)$$

Вычисление  $h(t)$  по  $H(t)$  сводится к дифференцированию последней по времени:  $h(t) = -H'(t)$ .

На практике в питающую линию измерительной установки обычно подается серия относительно длинных (порядка одной или нескольких секунд) однополярных или разнополярных импульсов, разделенных паузами, во время которых измеряется затухающий сигнал  $H(t)$ .

Имея в виду, что физическая реализация бесконечно-узких импульсов Дирака невозможна, и на практике вместо них речь идет об относительно коротких импульсах (длительностью не менее одного отсчета дискретизированных сигналов), под импульсной переходной характеристикой далее мы будем подразумевать реакцию на такие импульсы. В частности, переходная характеристика, отвечающая зондирующему импульсу длительностью 2 мс близка к импульсной характеристике, а импульсу длительностью 4 с – к переходной характеристике (рис. 1.3).

### §1.3 Основные сведения о вибрационной сейсморазведке

В отличие от традиционно применяемых в сейсморазведке импульсных (взрывных и невзрывных) источников упругих колебаний, в методах вибрационной сейсморазведки изучаемая среда подвергается воздействию продолжительных, переменных во времени колебаний, имеющих относительно небольшую амплитуду [Вибрационная..., 1990]. Ограниченность амплитуды воздействия дает возможность избежать разрушения верхних слоев грунта (поверхностного покрытия), что делает вибрационную сейсморазведку особенно удобной для городских условий. Она соответствует экологическим нормам и требованиям безопасности, а также оказывается более экономически целесообразной по сравнению с традиционными методами исследования.

В условиях относительно невысокой интенсивности сигнала источника, выигрыш в качестве получаемых данных обеспечивается за счет большой длительности вибрационного воздействия, которая обычно многократно превышает характерные времена прохождения полезных упругих волн в среде. При таком воздействии в изучаемом объеме среды на протяжении всего времени воздействия генерируются волны различных типов (продольные, поперечные, обменные, поверхностные), формирующие сложное волновое поле, регистрируемое сетью геофонов (сейсмоприёмников) в виде совокупности т.н. вибротрасс [Боганик и Гурвич, 2006]. В большинстве случаев можно считать, что (как и в случае ЭМ-зондирования линейных стационарных сред), зарегистрированный сигнал  $S(t)$  можно представить в виде интеграла свертки сигнала источника (управляющего сигнала)  $M(\theta)$  и импульсной переходной характеристики среды  $h(\theta)$ , определяющейся распределением коэффициентов отражения:

$$S(t) = \int_0^{\infty} h(\theta) * M(t - \theta) d\theta. \quad (1.6)$$

В качестве управляющих (или т.н. СВИП-сигналов, т.е., сигналов, задающих нагрузки) в вибрационной сейсморазведке используют квазигармонические частотно-модулированные (ЧМ) сигналы (рис.1.4), а также последовательности однополярных или разнополярных импульсов, следующих с одинаковыми или различными интервалами [Вибрационная..., 1990]. Как уже отмечалось, генерация колебаний земной поверхности в соответствии с изменением управляющего сигнала осуществляется в течение продолжительного времени (обычно – десятки секунд), превышающего как характерные периоды собственных колебаний среды, так и максимальные периоды волн, генерируемых при импульсном возбуждении, согласно условию:

$$F * T > 1 \quad (1.7)$$

здесь  $F$  — центральная частота сигнала, либо ширина полосы его частот;  $T$  — длительность управляющего сигнала.

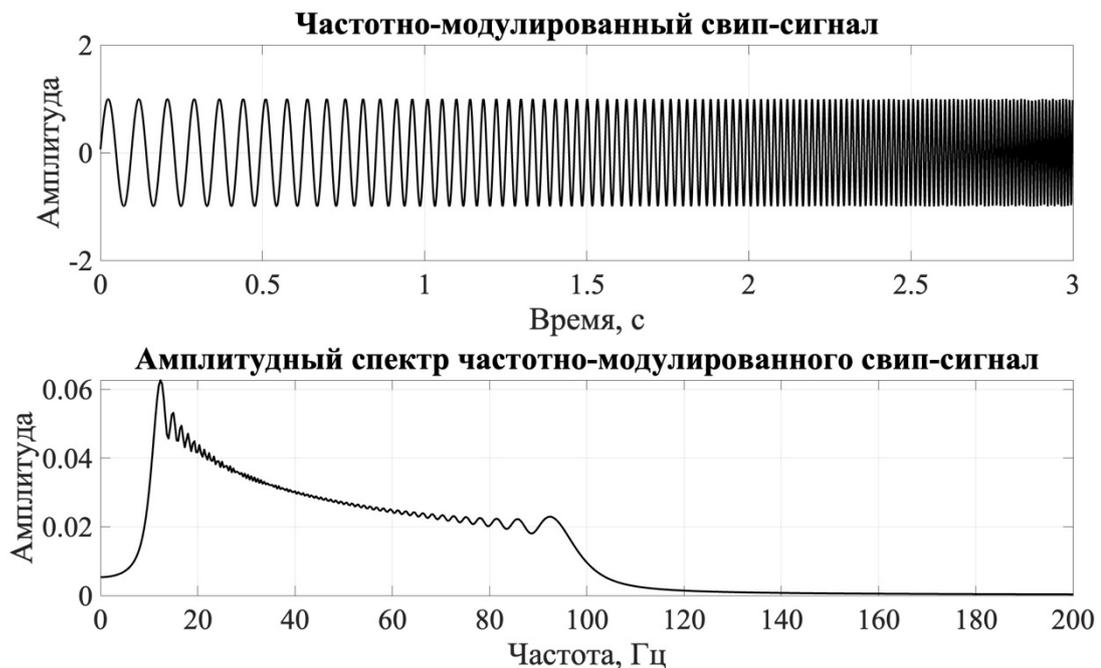


Рисунок 1.4 – Фрагмент квазигармонического частотно-модулированного (ЧМ) сигнала, используемого в качестве СВИП-сигнала при моделировании вибрационного зондирования в рамках данной диссертации. В верхней части рисунка проиллюстрировано временное представление ЧМ СВИП-сигнала, а в нижней – его амплитудный спектр.

Согласно неравенству (формула 1.7), сигналы вибрационной сейсморазведки относятся к сложным — обладающим широкой полосой частот, длительностью и

нестабильной амплитудно-фазовой структурой. Это приводит к наложению и интерференции волн, в результате чего формируется слабо разрешённое поле [Vedanti et al., 2020], где визуально невозможно выделить регулярные отражённые и преломлённые пакеты или определить времена их вступлений (рис.1.5).

Сжатие сигналов и выделение регулярных волн осуществляются с помощью корреляционных (временных) и спектральных методов. В последние десятилетия приоритет отдаётся именно корреляционным подходам благодаря их простоте и лёгкой реализации на современных персональных вычислительных системах [Вибрационная..., 1990].

Основу этого метода составляет вычисление функции взаимной корреляции (взаимно-корреляционной функции, ВКФ) сигналов с последующим сравнением её значений с заданным порогом.

Таким образом, стандартный подход в вибрационной сейсморазведке заключается в использовании квазигармонических частотно-модулированных (ЧМ) сигналов или последовательностей однополярных или разнополярных импульсов. В результате регистрации формируются сложные виброграммы, которые анализируются математическими методами, в частности путём вычисления функции взаимной корреляции, преобразующей виброграмму в коррелограмму. На практике этот метод доказал свою эффективность, однако в ряде случаев качество разделения отражений на коррелограммах оказывается недостаточным [Vedanti et al., 2020]. Неоднозначность интерпретации коррелограмм указывает на необходимость поиска новых подходов к регистрации и обработке вибросейсмических данных.

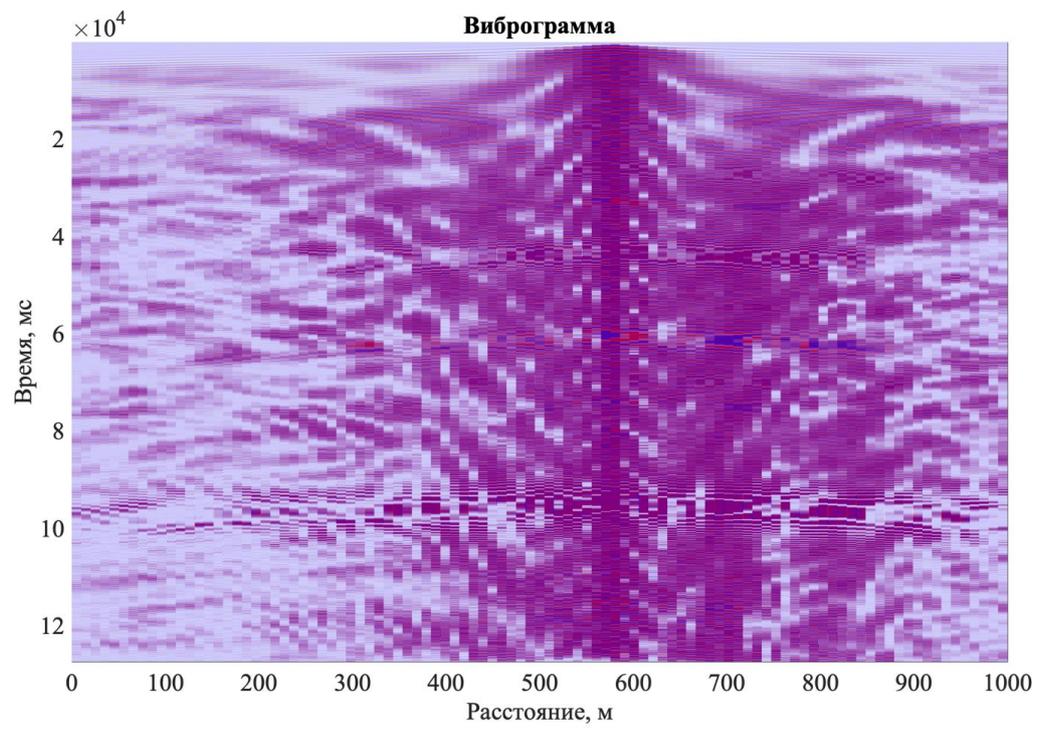


Рисунок 1.5 – Пример виброграммы общего пункта возбуждения для частотно-модулированного СВИП-сигнала.

#### §1.4 Принципы корреляционной обработки вибросейсмических данных

При обработке виброграмм чаще всего ограничиваются определением нормированных значений ВКФ управляющего сигнала  $M(t)$  и принятых сейсмотрасс (вибротрасс)  $S(t)$  [Вибрационная..., 1990]:

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) * M(t + \tau) dt \quad (1.8)$$

Переход к ВКФ дает возможность выделения индивидуальных отражений в виде пиковых амплитуд  $R(\tau)$ , наблюдаемых на временах  $\tau$ , отвечающих соответствующим временам пробега. Результатом расчета ВКФ для одной вибротрассы называют корреляционной трассой, а для набора вибротрасс – коррелограммой. Для последующего выделения интенсивных вступлений проводится сравнение значений ВКФ с заданной пороговой величиной [Вибрационная..., 1990].

С учетом равенства 1.6 корреляционный интеграл (формула 1.8) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T h(\theta) \int_0^\infty M(t - \theta) M(t + \tau) dt d\theta = \\ &= \int_0^\infty h(\theta) r(\tau - \theta) d\theta \end{aligned} \quad (1.9)$$

где:

$$r(\tau - \theta) = \frac{1}{T} \int_0^T M(t - \theta) M(t + \tau) dt d\theta \quad (1.10)$$

Из формулы 1.9 видно, что вычисление корреляционного интеграла эквивалентно вычислению свертки импульсной переходной характеристики среды

$h(\tau)$  с автокорреляционной функцией (АКФ) сигнала источника (управляющего сигнала). Формально это можно интерпретировать как реакцию среды, т.е., формирование сейсмотрассы в ответ на импульсное воздействие в виде АКФ. Как и в исходном соотношении (1.6), ядро свертки  $h(\theta)$  несет информацию об изучаемой среде и определяется распределением коэффициентов отражения по разрезу.

Второй способ обработки, обычно называемый деконволюцией [Вибрационная..., 1990], основан на решении уравнения свертки (формула 1.6), которое может быть сведено к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Этот подход мы обсудим позднее.

## ГЛАВА 2. ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

### §2.1 Основные сведения об использовании псевдослучайных сигналов в геофизических измерительных системах

В работах ряда исследователей [Светов и др., 2012; Svetov et al., 2012; Ильичев, Бобровский, 2014; Великин и Великин, 2016] был предложен и опробован альтернативный метод, заключающийся в замене традиционной последовательности длинных импульсов одинаковой амплитуды, применяемой с последующим усреднением кривых отклика, на подачу в питающую линию псевдослучайной бинарной последовательности (PRBS) — коротких импульсов переменной полярности. Такие сигналы, также известные как шумоподобные (ШПС), обладают широким спектром частот и статистическими характеристиками, близкими к свойствам белого гауссовского шума (рис. 2.1).

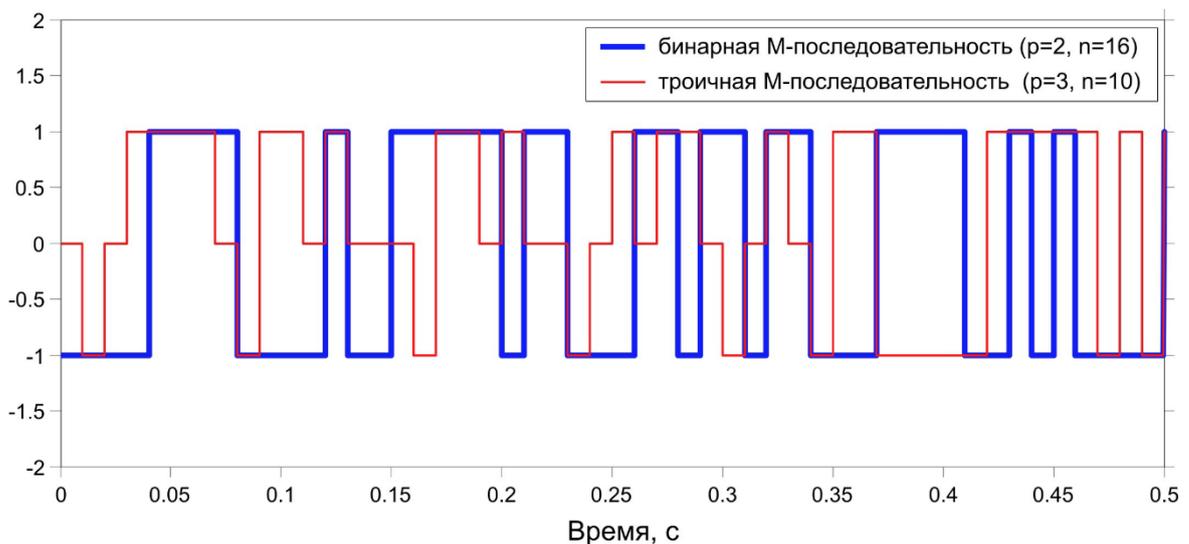


Рисунок 2.1 – Пример псевдослучайных двоичной (синий цвет) и троичной (красный цвет) кодовых последовательностей с различной длительностью элементарного импульса.

Среди различных кодовых сигналов наибольшее практическое применение получили так называемые M-последовательности (maximum-length sequences), которые представляют собой дискретные периодические ряды, сформированные из элементарных импульсов прямоугольной или иной формы. Значения амплитуды (или других параметров этих импульсов) выбираются из ограниченного множества

дискретных уровней, чаще всего соответствующих простым числам, таким как 2, 3 и т. д. Эти значения распределяются в последовательности практически равномерно — количество импульсов каждого уровня отличается не более чем на единицу, что обеспечивает равновероятное распределение. М-последовательности характеризуются простой алгоритмизацией, лёгкостью цифровой генерации и эффективным использованием в составе цифровых систем передачи и приема сигналов. По своей сути, они представляют собой периодические цифровые коды, формируемые с применением линейных регистров сдвига с обратной связью (LFSR), функционирующих на основе алгебраических свойств конечных полей Галуа  $GF(b)$ , где  $b$  — основание алфавита, обычно принимающее значения 2 (бинарные) или 3 (троичные) [Zerneck, Finger, 2005].

М-последовательности обладают максимально возможной длиной периода  $L = b^n - 1$ , где  $n$  — порядок регистра, определяющий длину памяти системы. Генерация последовательности реализуется через обратную связь с весами, определяемыми примитивным многочленом степени  $n$ , задающим структуру обратной связи. Каждый следующий элемент последовательности формируется как взвешенная сумма предыдущих регистровых значений по модулю  $b$ :

$$m(t + 1) = \left( \sum_{i=1}^n w_i r_i(t) \right) \bmod b \quad (2.1)$$

где  $w_i \in \{0,1\}$  — веса (структура обратной связи)  $r_i(t)$ , — содержимое регистра, а  $m(t)$  — текущее выходное значение.

После генерации последовательность может быть циклически сдвинута и преобразована в нужный амплитудный формат. Так, бинарная М-последовательность обычно отображается в набор  $\{-1,+1\}$ , а троичная — в  $\{-1,0,+1\}$ . Подобные преобразования приближают их поведение к широкополосному белому шуму, при этом обеспечивая строго детерминированную и воспроизводимую структуру.

В рамках линейной (сверточной) модели “среда-установка” можно предполагать, что при возбуждении системы псевдослучайной ШПС-последовательностью  $m(t)$ , последняя сворачивается с импульсной переходной характеристикой  $h(t)$ , в результате чего на выходе системы формируется последовательность  $s(t)$ :

$$s(t) = m(t) * h(t) \quad (2.2)$$

На рисунке 2.2 приводятся примеры двоичных токовых последовательностей с кодовыми элементами различной длительности (левый столбец), а также соответствующие им сигналы (правый столбец).

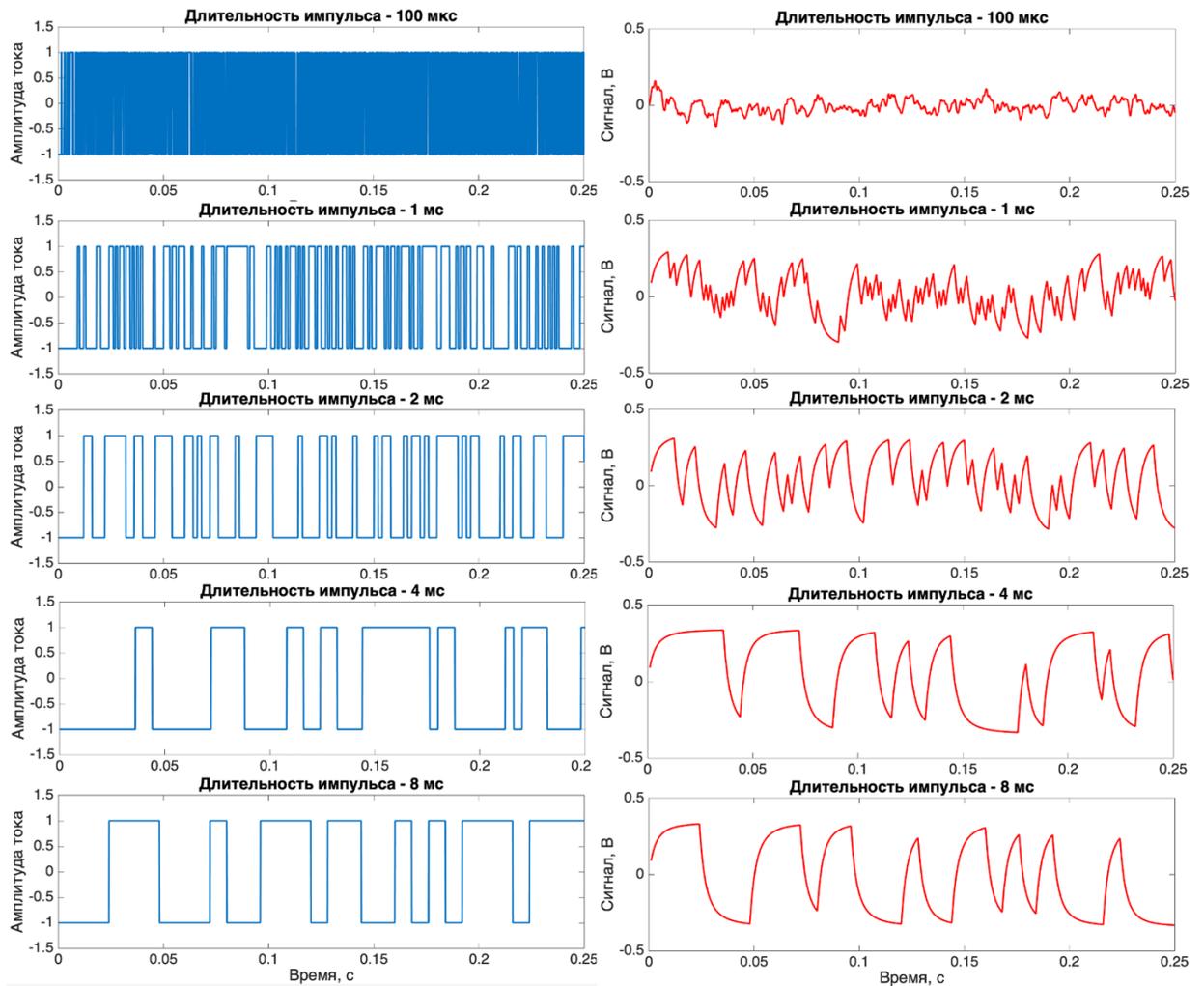


Рисунок 2.2 – Слева: примеры сигналов источника с различной длительностью элементарного импульса (кодového элемента); справа: соответствующие им ШПС-отклики.

## §2.2 Подходы к оценке переходной характеристики (отклика) среды

Задача обработки зарегистрированных ШПС-рядов состоит в восстановлении ИПХ  $h(t)$  по последовательности  $s(t)$ . Для решения этой задачи в технических приложениях используется связь между автокорреляционной функцией (АКФ) входного сигнала  $A_{mm}(t)$  и взаимной корреляционной функцией (ВКФ) сигналов на входе и выходе системы  $B_{ms}(t)$ , которая выражается через свёртку с импульсной характеристикой  $h(t)$  [Ипатов, 1992]:

$$B_{ms}(t) = A_{mm}(t) * h(t) \quad (2.3)$$

Согласно теории ШПС, с увеличением длины последовательности её АКФ приближается к  $\delta$ -функции [Варакин, 1985]. Таким образом, ВКФ на выходе корреляционного приёмника можно считать приближённой оценкой ИПХ среды  $h(t)$ . Помехоустойчивость ШПС характеризуется подавлением помех на выходе приёмника, которое выражается через соотношение:

$$q^2 = 2Vp^2 \quad (2.4)$$

где  $V=FT$  — база сигнала,  $q^2, p^2$  - отношения мощностей сигнала и шума на выходе и входе системы, соответственно. Таким образом, отношение сигнал/шум может быть улучшено в  $2V$  раз. Для повышения помехозащищённости сигнала важно увеличить базу возбуждающей последовательности, что означает использование ШПС с более широким спектром. В дискретных последовательностях база сигнала определяется числом дискретных значений  $N$  в последовательности.

В соответствии с уравнением (формула 2.2), задача определения импульсной переходной характеристики (ИПХ) среды сводится к решению уравнения свертки. В технических приложениях обычно ограничиваются вычислением ВКФ (формула 2.3). Одной из ключевых задач при разработке метода зондирования

шумоподобными сигналами является оптимальный выбор псевдослучайных последовательностей (ПСКП) и методов вычисления автокорреляционной функции (АКФ) и взаимной корреляционной функции (ВКФ) [Ипатов, 1992]. Если АКФ последовательности близка к  $\delta$ -функции, то ВКФ, полученная для генерируемой последовательности  $m(t)$  и зарегистрированного сигнала  $s(t)$ , будет представлять собой приближенное решение для ИПХ.

Однако даже при использовании длинных последовательностей ( $N$  – несколько миллионов) из-за несовершенства аппроксимации  $\delta$ -функции через АКФ, в ВКФ могут возникать флуктуации, которые уходят в область отрицательных значений. Эти флуктуации могут существенно ограничивать достоверность результатов по ИПХ, а также выступать естественным ограничителем для уровня подавления помех.

В отличие от стандартного подхода, основанного на расчете ВКФ, в [Светов и др., 2012] был использован метод оценки ИПХ  $h(t)$  на основе деконволюции, т.е., решения уравнения свертки (формула 2.2) с заданными  $m(t)$  и  $s(t)$  методом наименьших квадратов (МНК). При переходе к дискретному представлению, где функции  $m$ ,  $h$  и  $s$  представлены векторами:

$$m = \{m_i\}, i = 1 \dots N; \quad h = \{h_i\}, i = 1 \dots M; \quad s = \{s_j\}, j = 1 \dots N + M - 1 \quad (2.5)$$

уравнение свертки (формула 2.2) преобразуется в систему линейных уравнений:

$$\sum_i m_i * h_{j-i} = s_j \quad (2.6)$$

где суммирование проводится по индексам, соответствующим допустимым диапазонам векторов  $m$ ,  $h$  и  $s$ . В матричной форме система линейных уравнений записывается как:

$$A \cdot h = s \quad (2.7)$$

где

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ m_2 & m_1 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & m_2 & \ddots & \ddots & \vdots \\ m_N & \vdots & \ddots & m_1 & 0 \\ 0 & m_N & \ddots & m_2 & m_1 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & m_2 \\ \vdots & \ddots & \ddots & m_N & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & m_N \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \\ s_{N+1} \\ \vdots \\ s_{N+M-1} \end{pmatrix}, \quad (2.8)$$

В случае, если длина псевдослучайной последовательности превышает длительность восстанавливаемой импульсной характеристики, система линейных алгебраических уравнений (см. формулу 2.8) становится переопределённой, и для её решения может быть применён метод наименьших квадратов (МНК). Применение МНК позволяет сократить вычислительные затраты, обеспечивая переход от СЛАУ (2.8), в которой матрица  $A$  имеет размер  $(N + M - 1) \times M$ ,  $N \gg M$ , к нормальной СЛАУ с матрицей размеров  $M \times M$  [Алексеев и др., 2023] :

$$A^T \cdot A \cdot h = A^T \cdot s \quad (2.9)$$

где

$$A^T = \begin{pmatrix} m_1 & m_2 & \cdots & m_N & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & m_1 & m_2 & \ddots & m_N & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & m_1 & m_2 & \ddots & m_N & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & m_1 & m_2 & \cdots & m_N \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Следует подчеркнуть, что данное преобразование задачи позволяет избежать необходимости хранения матриц  $M$  и  $M^T$ , отдельно. Вместо этого необходимо лишь вычислить и сохранить матрицу  $A_1 = A^T \cdot A$  и вектор  $B = A^T \cdot s$ . Матрица  $A_1$  имеет

размер  $M \times M$  и является симметричной и квадратной, тогда как вектор  $V$  состоит из  $M$  элементов. Таким образом, задача упрощается до решения системы:

$$A_1 \cdot h = V \quad (2.11)$$

что значительно снижает вычислительные затраты. Эта система линейных уравнений может быть решена с использованием прямых методов, так как матрица  $A_1$  квадратная, и, если решение существует, оно будет точным.

При решении задач, связанных с деконволюцией, особенно в контексте восстановления сигналов или обработки данных, важно учитывать стабильность и устойчивость метода, используемого для получения решения. Однако в случае плохо обусловленных систем и/или зашумленных данных стандартное решение МНК может привести к неустойчивым результатам. Для того чтобы обеспечить устойчивости решения применяется так называемая регуляризация [Li, H et al., 2023].

Одним из наиболее распространённых и математически обоснованных подходов является регуляризация Тихонова, заключающаяся во включении в функционал дополнительного стабилизирующего слагаемого, пропорционального норме решения [Фазылов В.Р., и др., 2010]. Это позволяет смягчить влияние ошибок и шумов в данных. Регуляризация Тихонова для уравнения (2.7) приводит к модифицированной форме задачи:

$$(A^T \cdot A + \lambda I) \cdot h = A^T \cdot S \quad (2.12)$$

где  $I$  — единичная матрица, а  $\lambda > 0$  — параметр регуляризации. Соответствующее решение может быть выражено как:

$$h = (A^T \cdot A + \lambda I)^{-1} A^T \cdot S \quad (2.13)$$

Параметр  $\lambda$  определяет баланс между точностью аппроксимации экспериментальных данных и степенью регуляризации. При малых значениях  $\lambda$  модель стремится к точному воспроизведению данных, что может приводить к усилению шумов и неустойчивости решения. При больших значениях — доминирует влияние стабилизатора, приводящее к чрезмерному сглаживанию и потере важных деталей. Таким образом, выбор  $\lambda$  существенно влияет как на устойчивость численного решения, так и на его физическую интерпретируемость. Один из распространённых подходов к подбору параметра  $\lambda$  заключается в минимизации функционала [Фрумин Л. Л., 2002]:

$$J_\lambda(h) = \|Ah - S\|^2 + \lambda\|h\|^2 \quad (2.14)$$

Однако при таком подходе оценка качества проводится на тех же данных, по которым вычисляется решение, что создаёт риск переобучения: результат может быть избыточно подогнан под шумовые компоненты.

Для предотвращения этого применяется  $k$ -кратная кросс-валидация, позволяющая оценить обобщающую способность модели.

Метод кросс-валидации [Gu С., 2008] предполагает разбиение исходного набора данных на  $k$  непересекающихся подмножеств одинаковой мощности. На каждой итерации одно из них используется в качестве тестовой выборки  $(A_{\text{test},i}, S_{\text{test},i})$ , а остальные  $k-1$  — как обучающая выборка  $(A_{\text{train},i}, S_{\text{train},i})$ . Решение  $h_\lambda^{(i)}$  определяется по обучающей подвыборке:

$$h_\lambda^{(i)} = (A_{\text{train},i}^T A_{\text{train},i} + \lambda I)^{-1} A_{\text{train},i}^T S_{\text{train},i} \quad (2.15)$$

Затем полученное решение проверяется на тестовой части, и для каждого значения  $\lambda$  вычисляется среднеквадратичная ошибка:

$$E_{\lambda} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k |A_{\text{test},i} h_{\lambda} - S_{\text{test},i}| \quad (2.16)$$

Оптимальное значение регуляризационного параметра определяется как:

$$\lambda^* E_{\lambda} = \arg \min_{\lambda} E_{\lambda} \quad (2.17)$$

Таким образом, кросс-валидация позволяет объективно выбрать параметр  $\lambda$ , обеспечивающий устойчивое и обобщаемое решение, минимизируя риск переобучения и адаптации под шум [James G., 2013]. Это особенно важно в условиях неконтролируемой зашумлённости данных, характерных для прикладных задач сейсморазведки и других направлений геофизической инверсии.

### §2.3 Принципы использования псевдослучайных кодовых последовательностей в качестве управляющего сигнала в системах вибрационной сейсморазведки

Как и в импульсной электроразведке, в случае вибрационной сейсморазведки ключевым условием для точного выделения отражающих границ на коррелограммах является применение свип-сигналов с узкой, симметричной и хорошо локализованной автокорреляционной функцией (АКФ). Как показано в работе [Dean, 2014], традиционные линейные частотно-модулированные (ЛЧМ) сигналы не всегда обеспечивают достаточное качество разделения отражений, особенно в условиях сложной волновой картины и наличия интенсивных помех. В этом контексте псевдослучайные (шумоподобные, ШПС) сигналы свип-сигналы, в частности, основанные на M-последовательностях, также представляют особый интерес [Варакин, 1985; Zernick, Finger, 2005]. Их характерной особенностью является узкий главный лепесток АКФ при минимальных и быстро затухающих боковых лепестках (рис. 2.3), что делает такие сигналы особенно эффективными для повышения временного разрешения и улучшения читаемости коррелограмм, т.к. такая форма АКФ обеспечивает высокую временную локализацию отражений, что особенно критично при исследовании геологических сред с относительно тонкими слоями в условиях сильного зашумления и наложения множества волн-помех.

Говоря о различных вариантах псевдослучайных свип-сигналов, необходимо понимать, что в качестве псевдослучайного параметра может выступать не только сама амплитуда, но и такие характеристики как моменты смены полярности несущей, ее период и ряд других.

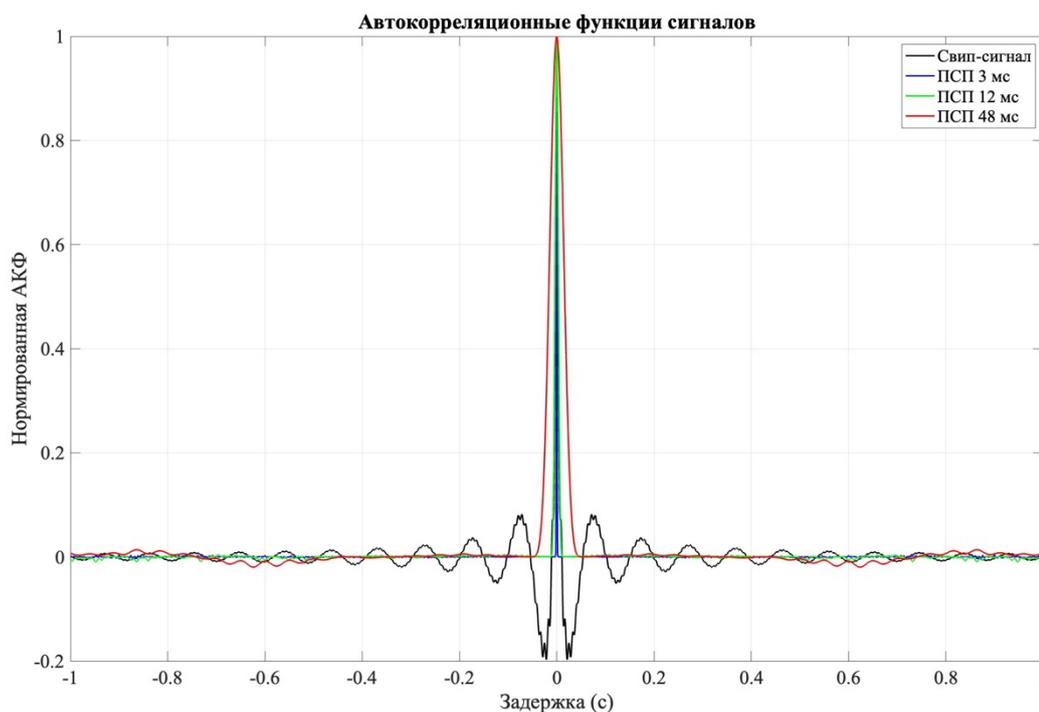


Рисунок 2.3 – Нормированные автокорреляционные функции свип-сигналов различной модуляции: чёрная кривая – свип-сигнал с экспоненциальной частотной модуляцией, синяя – ПСП с длительностью импульса 3 мс, зелёная – ПСП с длительностью 12 мс, красная – ПСП с длительностью 48 мс.

Интерес к применению ШПС в вибрационной сейсморазведке возник ещё в 1960-х гг., когда были предложены первые подходы к их генерации [Wischmeyer, 1966; Crook et al., 1966], однако широкое применение долгое время ограничивалось техническими сложностями и отсутствием необходимой элементной базы. Ситуация изменилась в 2000-х годах с развитием технологий синхронного возбуждения и появлением систем многоканальной сейсморазведки с перекрытием сигналов от различных источников. Как обсуждается в [Dean, 2014], ШПС оказались потенциально востребованными в этих условиях благодаря высокой степени ортогональности, возможности формирования широкого спектра, а также минимизации перекрёстных корреляций между сигналами разных источников.

Попытки изучить возможность применения ШПС в вибрационной сейсморазведке предпринимались различными авторами. Например, работа [Strong and Hearn, 2004] посвящена численному моделированию псевдослучайных сигналов, генерируемых наземными источниками, работающими по методике Mini-SOSIE [Barbier et al., 1976]. Авторы сравнивают два варианта свипа с частотой

несущей 150 Гц, модулированного псевдослучайным набором моментов изменения полярности по полному периоду, либо полупериоду несущей. Показана более четкая локализация и проявленность отражений на фоне случайных шумов различного типа по сравнению со стандартным свипом с линейным изменением частоты в диапазоне 30-250 Гц. Авторы исследований [Scholtz, 2012; 2013] решали задачу подбора таких псевдослучайных свип-сигналов, которые обеспечили бы оптимальность АКФ и минимизацию сейсмического воздействия различные объекты инфраструктуры (на территориях с застройкой). Оптимизация велась с учетом максимальных ускорений/смещений, генерируемых вибратором. С точки зрения этих критериев было показано преимущество рассмотренных вариантов псевдослучайного свип-сигнала перед стандартным линейным свипом.

В целях улучшения разрешающей способности и отношения сигнал/шум (SNR) авторы работы [Sun et al., 2009] сравнивали ряд двоичных и троичных псевдослучайных свип-сигналов, а также реализовали генерацию троичных сигналов, АКФ которых оказались более оптимальными, в сейсмическом вибраторе. В статье [She, 2011] проводится численный анализ и предлагается метод построения псевдослучайного сейсмического свипа на основе генератора последовательностей максимальной длины, полосового фильтра и цифро-аналогового преобразователя. Отмечается, что АКФ свип-сигналов, получаемых в рамках описанной схемы, оказываются достаточными для хорошей локализации отражений. [Жуков и др., 2017] исследовали возбуждение псевдослучайных свип-сигналов в одновременном режиме и отметили повышения качества разделения зарегистрированных сигналов. [Хасан и Кострыгин, 2018] рассмотрели ряд псевдослучайных импульсных последовательностей, а также сигналов с линейным изменением периода следования импульсов. В этой работе было показано, что спектры главных максимумов АКФ псевдослучайных сигналов близки к спектрам единичных импульсов, используемых для построения этих последовательностей. В то же время, авторами отмечается, что такие сигналы характеризуются повышенным уровнем помех на коррелограммах, что, видимо, требует дальнейшего исследования.

Развитие вычислительной техники позволило реализовать различные подходы к генерации ШПС — от простых М-последовательностей до спектрально-оптимизированных кодов (например, методы, предложенные в [Sallas et al., 2008]). Это дало новый импульс внедрению ШПС в прикладную сейсморазведку и обеспечило гибкость при выборе сигнала под конкретные задачи.

Кроме того, благодаря широкой спектральной характеристике (рис. 2.4), ШПС-сигналы обеспечивают эффективное проникновение как в приповерхностные, так и в глубокозалегающие горизонты. Особенно важно, что спектральную плотность таких сигналов можно гибко адаптировать под конкретные геофизические задачи — например, за счёт регулирования длительности элементарного импульса или изменения несущей частоты. Как отмечается в [Dean, 2014], ШПС хорошо зарекомендовали себя в условиях синхронного возбуждения, при котором несколько вибраторов работают одновременно. В таких сценариях применение ортогональных ШПС позволяет эффективно разделять сигналы от различных источников на этапе обработки, значительно снижая интерференционный шум и повышая разрешающую способность по глубине.

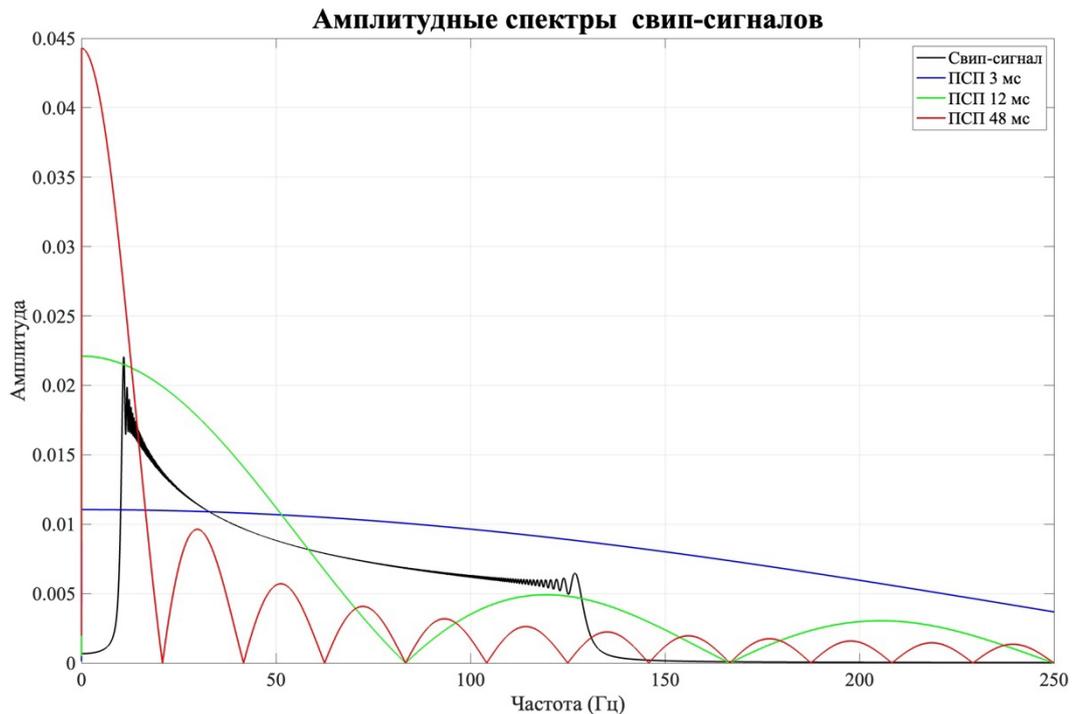


Рисунок 2.4 – Амплитудные спектры свип-сигналов различной модуляции: чёрная кривая – свип-сигнал с экспоненциальной частотной модуляцией, синяя – ПСП с длительностью импульса 3 мс, зелёная – ПСП с длительностью 12 мс, красная – ПСП с длительностью 48 мс.

Другим важным аспектом применения ШПС является снижение сейсмического воздействия на окружающую среду. Благодаря более «размазанной» по времени и частотам структуре сигнала, амплитуда резонансных составляющих существенно ниже по сравнению с ЛЧМ, что снижает риск повреждений инфраструктуры при проведении съёмок вблизи населённых пунктов или технических объектов.

Наконец, использование ШПС открывает новые перспективы в задачах совместной инверсии, высокоточной оценки характеристик среды и построения сейсмических изображений. Возможность гибкого программного формирования сигнала позволяет адаптировать форму свипа под конкретные задачи и особенности структуры, что делает ШПС универсальным инструментом современной сейсморазведки.

Таким образом, выбор ШПС обоснован как с точки зрения теории, так и с учетом практических ограничений. В данной работе использованы свип-сигналы, сформированные на основе ПСКП (М-последовательностях), с разной

длительностью и параметрами несущей. Выбор конкретных параметров базировался на анализе спектральных характеристик и форме АКФ, с целью достижения баланса между высокой временной разрешающей способностью и устойчивостью к помехам.

В главе 4 приводятся результаты корреляционной и деконволюционной обработки виброграмм, полученных путем одномерного и двумерного численного моделирования с последующим зашумлением.

### ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ (ШУМОПОДОБНЫХ) СИГНАЛОВ В МОРСКОЙ БУКСИРУЕМОЙ ДИПОЛЬ-ДИПОЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ

#### §3.1 Проблема помехоподавления при регистрации данных ЗСБ с использованием морской буксируемой диполь-дипольной установки

В классическом варианте морского зондирования становлением поля с применением буксируемой измерительной установки измерения проводятся следующим образом: при прохождении тока через генераторную линию АВ производится, а с использованием приемного датчика электрического поля (приемной линии MN) регистрируется временная зависимость для соосной составляющей напряженности электрического поля  $E_x$ . Эта составляющая выбирается, поскольку обеспечивает наиболее простой способ измерения и наилучшее отношение сигнал/шум. Получаемый в таких условиях переходной процесс формирования поля характеризуется определённой динамикой. На практике, как правило, фиксируется участок кривой, соответствующий затухающему отклику после выключения тока в источнике. Это обусловлено тем, что данный участок наименее подвержен искажениям, возникающим во время пропускания тока. Форма спадающей части отклика содержит сведения о распределении электропроводности в геоэлектрическом разрезе, и сама кривая обычно обозначается как переходная характеристика (ПХ). При достаточной продолжительности импульса принято считать, что она практически совпадает с откликом на полубесконечную ступенчатую функцию выключения тока [Светов и др., 2012].

Полевые данные, полученные при геоэлектрических исследованиях на шельфе арктических морей с использованием осевой буксируемой установки дипольного типа (рис. 3.1), основанной на гальваническом методе возбуждения и приёма [Кошурников и др., 2016; Shakhova et al., 2017], демонстрируют существенные искажения кривых становления при использовании накопления сигналов от однополярных импульсов. Это связано с воздействием низкочастотных

шумов, источник которых, предположительно, кроется в электрокинетических и электрохимических процессах, возникающих во время перемещения приёмных электродов в водной среде [Егоров и Пальшин, 2015]. Эти шумы обладают выраженным низкочастотным спектром и оказывают значительное влияние на сигнал, особенно на интервале времени после 70–80 мс (рис. 3.2б) [Гончаров и др., 2022].

Присутствие таких помех приводит к заметному искажению формы переходной кривой, проявляющемуся в ненормально быстром или, напротив, замедленном спаде, нарушении её монотонного характера и, в ряде случаев, появлении отрицательных значений сигнала. Амплитуда этих шумов обычно составляет 2–5 мВ, причём нередко наблюдается наличие квазипостоянной составляющей, вызывающей смещение сигнала на несколько милливольт по амплитуде [Гончаров и др., 2022].

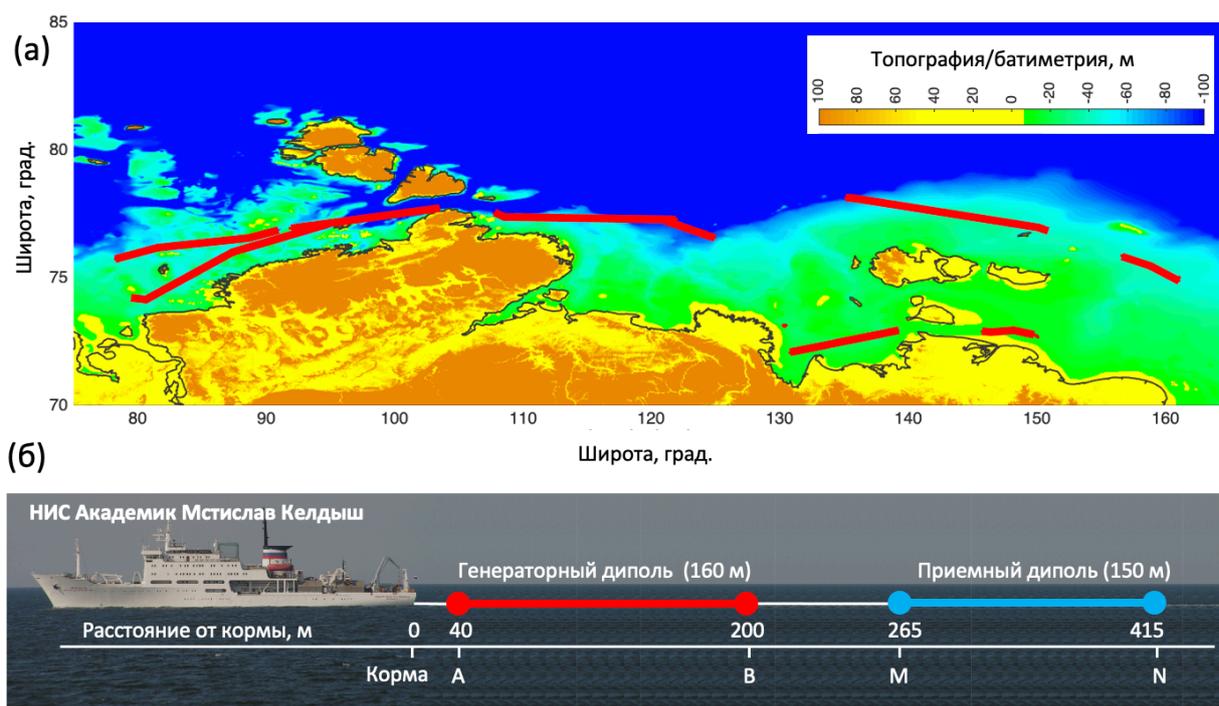


Рисунок 3.1 – (а) Схема расположения профилей (красные линии) с выполнением измерений методом ЗС в рамках 82 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2020 г.) на шельфе Российской Арктики; (б) Используемая измерительная установка и ее геометрические параметры.

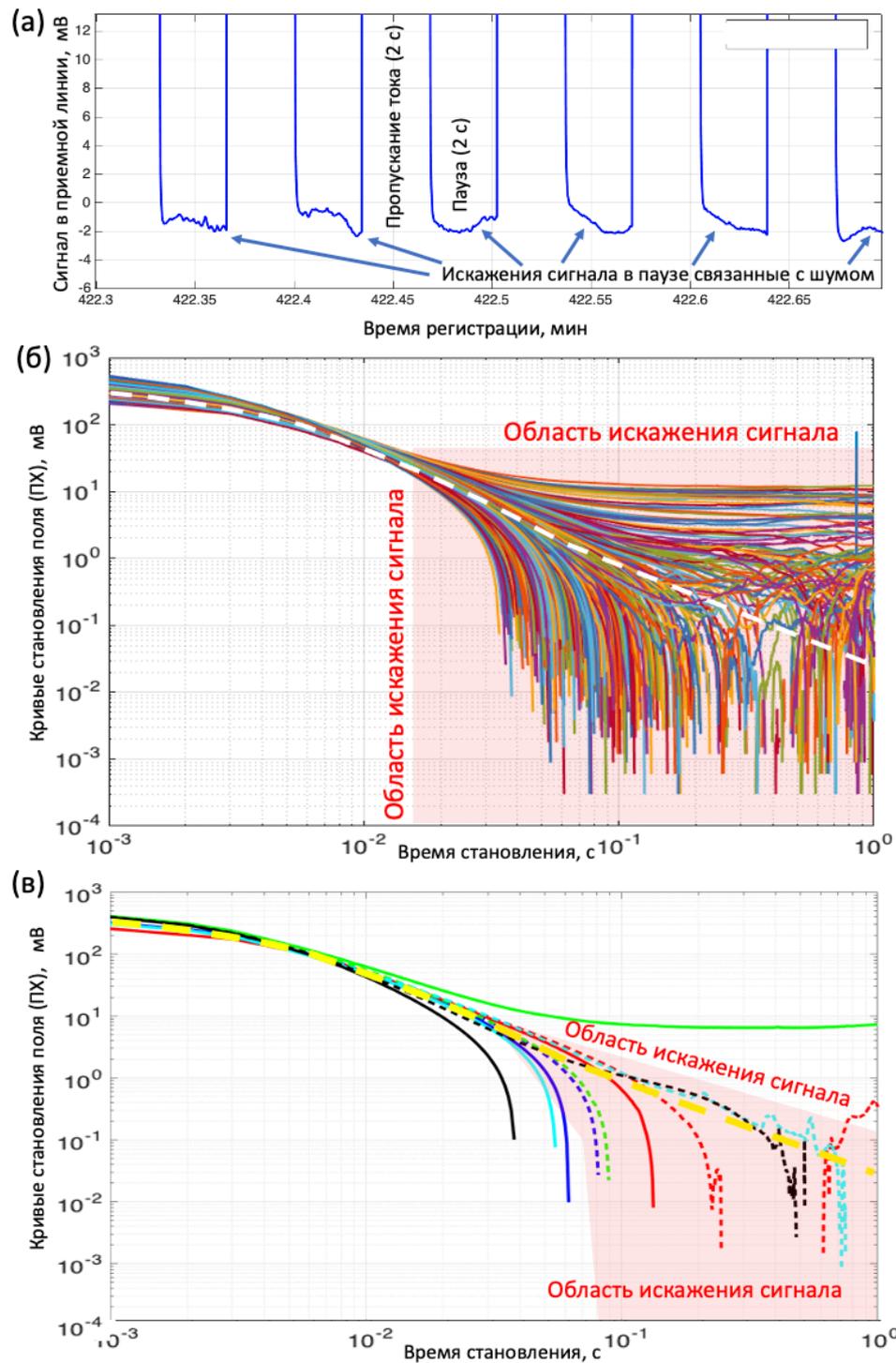


Рисунок 3.2 Примеры данных зондирования становлением поля (ЗС), полученных в ходе экспедиции научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» в 2020 году в акватории моря Лаптевых [Гончаров и др., 2022]. На панели (а) представлен 25-секундный фрагмент записи, демонстрирующий характерные искажения формы затухания сигнала в паузах между импульсами. Панель (б) содержит набор исходных кривых становления поля, зарегистрированных в южной части моря Лаптевых вдоль траверса протяжённостью около 300 км. Каждая из кривых отражает отклик на 2-секундный зондирующий импульс; на графике показана каждая десятая кривая из полного массива. Белым пунктиром обозначен результат численного моделирования ожидаемой кривой становления, соответствующей усреднённому геоэлектрическому разрезу, характерному для исследуемого региона. На панели (в) представлены пары кривых, соответствующих пяти различным пунктам наблюдения на траверсе: сплошные линии отображают данные до коррекции постоянной составляющей, пунктирные — после. Кривые одного цвета относятся к одному и тому же пункту. Жёлтым пунктиром показана эталонная кривая, идентичная белой пунктирной линии, представленной на панели (б).

При представлении в двойном логарифмическом масштабе (рис. 3.2б) искажение кривых становления поля выражается либо в их резком изгибе на поздних временах в сторону более низких значений с последующим переходом в отрицательную область, либо, наоборот, завышении значений ПХ и выполаживании ветвей, в зависимости от превалирующего значения квазипостоянной составляющей шумового сигнала в массиве индивидуальных кривых, по которому проводится накопление. В большинстве случаев искаженная часть отклика наблюдается начиная с времени становления, не превышающем 100 мс, что резко сокращает интерпретируемую часть ПХ, поскольку ее начальный сегмент отвечает условиям дальней зоны вследствие значительного разноса и высокой проводимости верхнего слоя геоэлектрического разреза (соленой воды с удельным сопротивлением 0.3–0.7 Ом\*м). Отметим, что коррекция кривых путем учета квазипостоянной составляющей, оцениваемой путем усреднения сигнала в области поздних времен становления (500-2000 мс) в большинстве случаев улучшает результат лишь незначительно, что иллюстрируется на рисунке 3.2в

Приведенные выше примеры экспериментальных данных ЗСБ отражают одну из ключевых особенностей, состоящую в быстром убывании полезного сигнала со временем, в результате чего на поздних временах становления его амплитуда становится мала, и наблюдается существенное преобладание шумовой компоненты над полезным сигналом, что приводит к искажению отклика и затрудняет его достоверную интерпретацию (рис. 3.3).

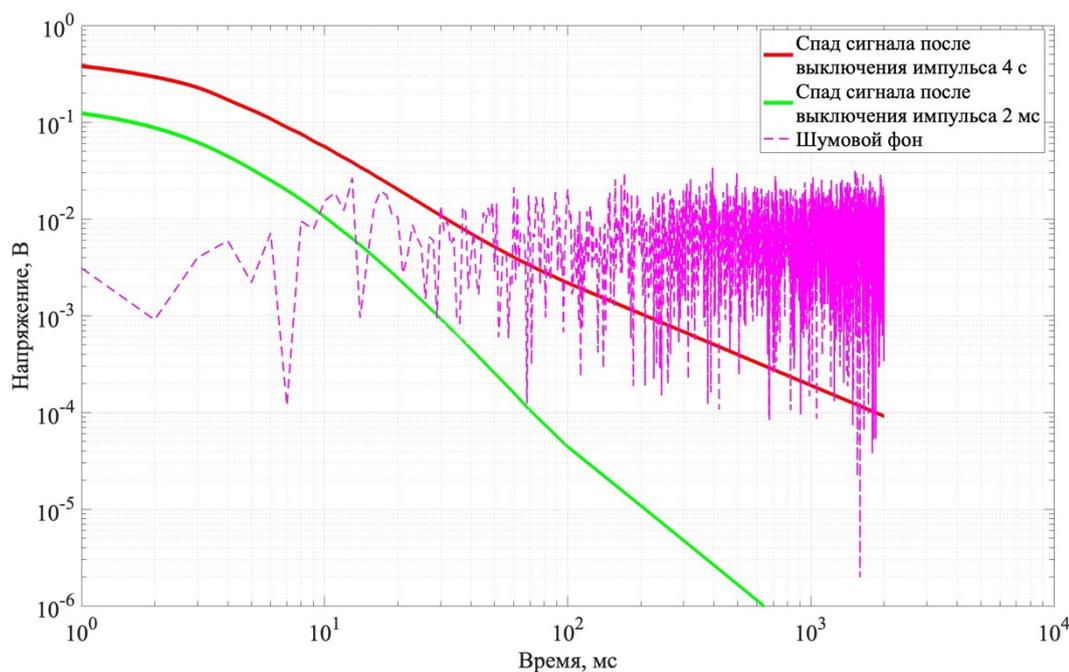


Рисунок 3.3 – Сопоставление полезного сигнала и шума в данных ЗСБ: красная кривая — логарифм спада напряжения после выключения импульса длительностью 4 с; синяя кривая — логарифм спада напряжения после отключения импульса длительностью 2 мс; сиреневая кривая — пример шумового сигнала.

Целью обработки данных ЗСБ является минимизация искажений и подавление различных типов шумов. В наземных измерительных системах это, как правило, реализуется посредством накопления — многократной регистрации отклика (рис. 3.4) с последующим усреднением полученных кривых (рис. 3.5–3.6). Такой подход позволяет повысить отношение сигнал/шум (SNR), однако требует увеличения времени наблюдений. При доминировании гауссовского шума накопление  $N$  независимых реализаций приводит к увеличению SNR примерно в  $\sqrt{N}$  раз. Вместе с тем, в присутствии систематических шумов, вызывающих смещение оценки сигнала, эффективность накопления существенно снижается, поскольку такие искажения не компенсируются при усреднении.

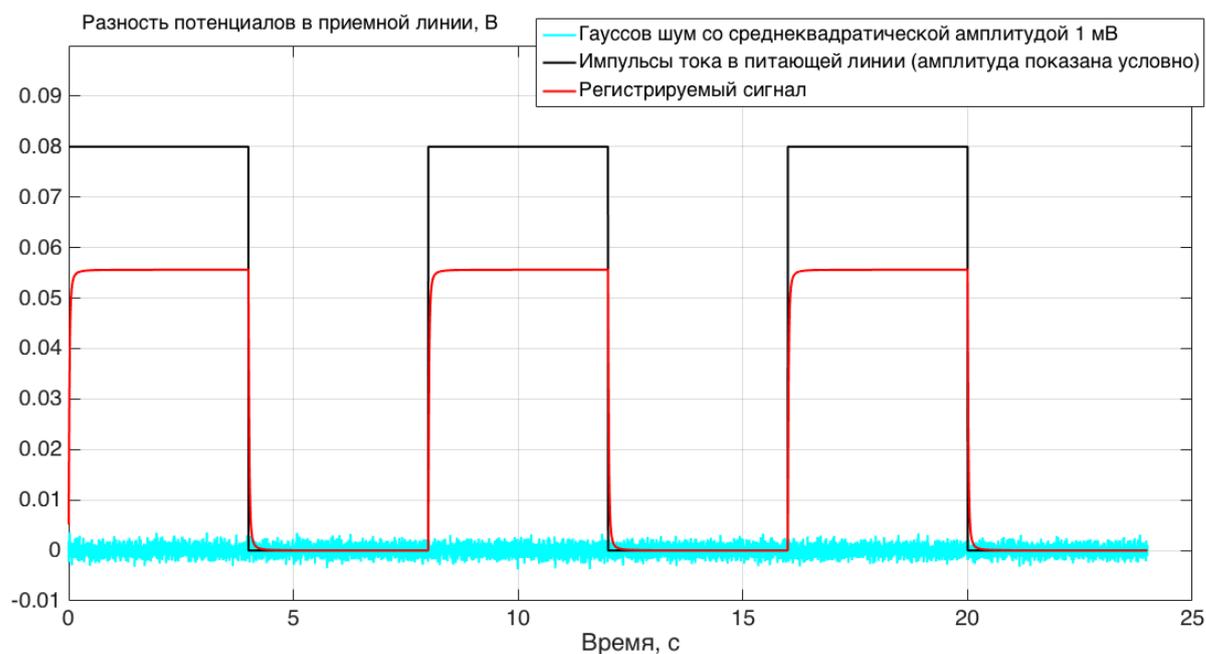


Рисунок 3.4 – Серия импульсов, используемая в традиционном методе подавления помех при зондировании становлением поля: черная кривая — серия импульсов силы тока, генерируемых в генераторе; красная кривая — серия импульсов напряжения, регистрируемых в приемной линии; бирюзовая кривая — синтетический гауссовский шум.

Ниже показаны результаты накопления искусственно-зашумленных кривых становления с использованием 66 реализаций синтетического высокочастотного (рис.3.5) и экспериментально-зарегистрированного низкочастотного (рис. 3.6) шума.

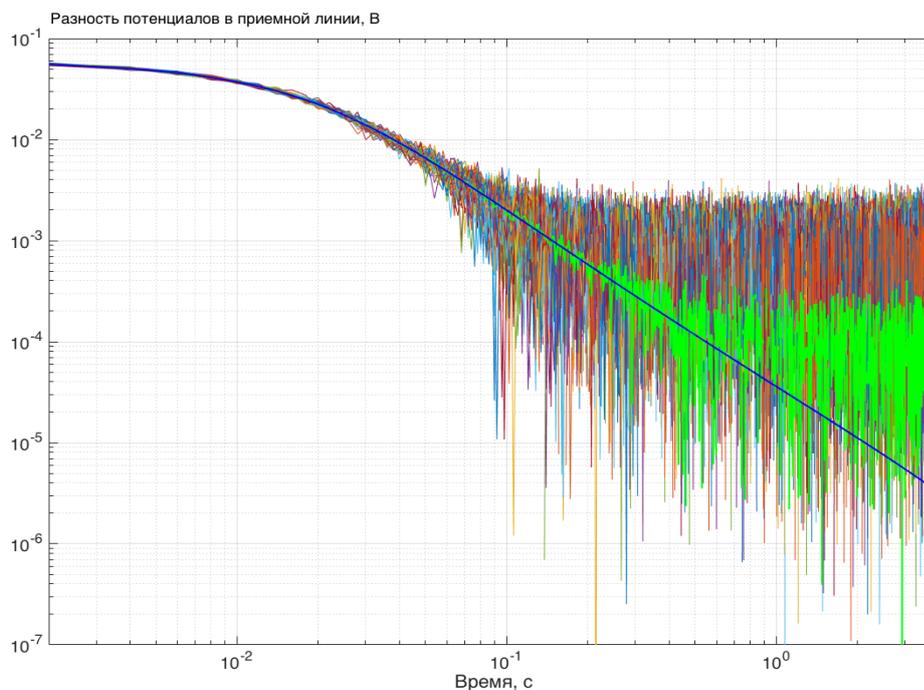


Рисунок 3.5 – Пример применения метода накопления по 66 кривым в паузе с добавлением синтетического Гауссовского шума. Различными цветами показаны реализации зашумленных кривых; зеленым цветом – результат осреднения (накопления); синим – истинная кривая.

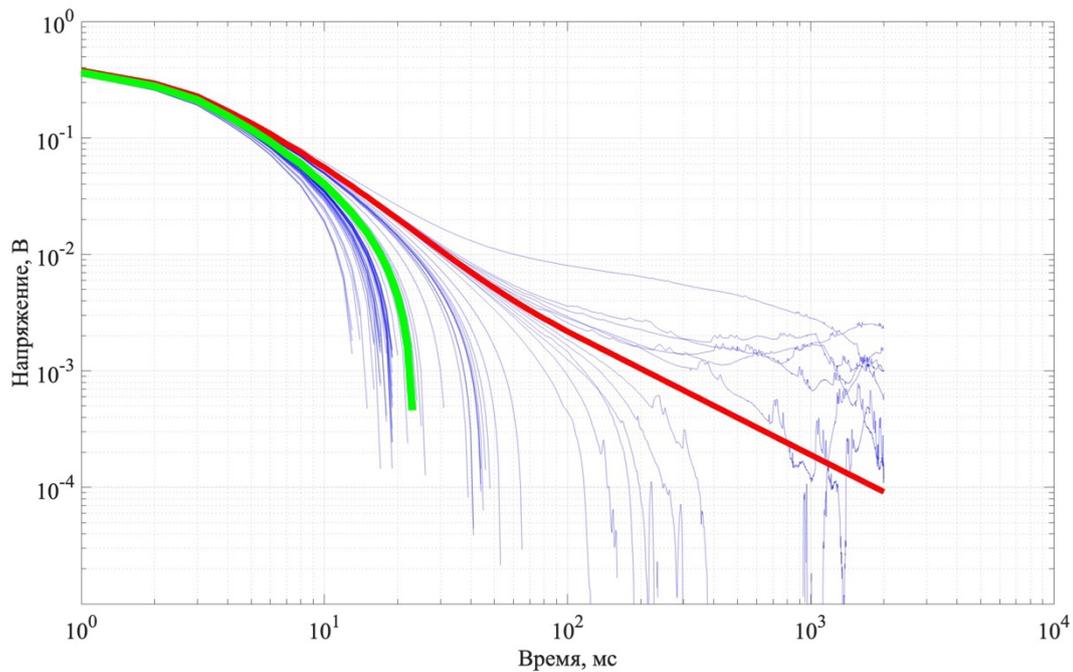


Рисунок 3.6 – Иллюстрация применения традиционного метода подавления помех при ЗСБ: набор из 66 зашумленных реализаций переходных характеристик (синие цвета), зеленая кривая — результат осреднения (накопления); красная кривая — истинная переходная характеристика среды.

В морских условиях применение накопления ограничивается кинематикой буксируемой аппаратуры: повторная регистрация в одной и той же точке затруднена ввиду непрерывного перемещения судна, в результате чего пространственное положение измерительной системы значительно изменяется в процессе съёмки. Следует также учитывать, что чрезмерное накопление приводит к снижению поперечного пространственного разрешения. Поэтому допустимые пределы усреднения определяются геометрическими параметрами измерительной системы и, как правило, не превышают длину передающего диполя.

В связи с низкой эффективностью традиционных методов подавления шума при зондировании становлением поля на Арктическом шельфе, представляется актуальным модифицировать систему наблюдения, повысив ее помехозащищенность за счет применения токовых сигналов специального вида. Одним из возможных решений может явиться использование псевдослучайных последовательностей импульсов тока, приближенных по своим спектральным и статистическим свойствам к гауссовскому шуму.

Исследование эффективности применения псевдослучайных кодовых последовательностей в качестве управляющего сигнала для зондирования становлением поля в ближней зоне на Арктическом шельфе с использованием морской буксируемой установки типа «диполь–диполь» было начато в рамках магистерской диссертации автора [Гончаров, 2021], результаты которой послужили отправной точкой для настоящей диссертационной работы.

В ходе численного моделирования была рассмотрена установка с длиной питающей линии 50 метров и приёмной линии 150 метров, работающая в трёхслойной среде с заданными электрофизическими параметрами: воздух (условно бесконечное сопротивление), вода (0,3 Ом·м, толщина слоя — 20 м) и грунт (100 Ом·м, глубина до основания — 100 м).

Были выполнены два численных эксперимента. В первом случае возбуждение осуществлялось одиночными прямоугольными импульсами длительностью 4 секунды на протяжении 64 секунд, что позволило восстановить переходную характеристику среды традиционным методом накопления. Во втором эксперименте использовалась бинарная псевдослучайная последовательность 2-миллисекундных импульсов, подаваемая в течение того же интервала времени. В этом случае импульсная переходная характеристика была восстановлена с помощью метода наименьших квадратов, описанного выше (рис. 3.7).

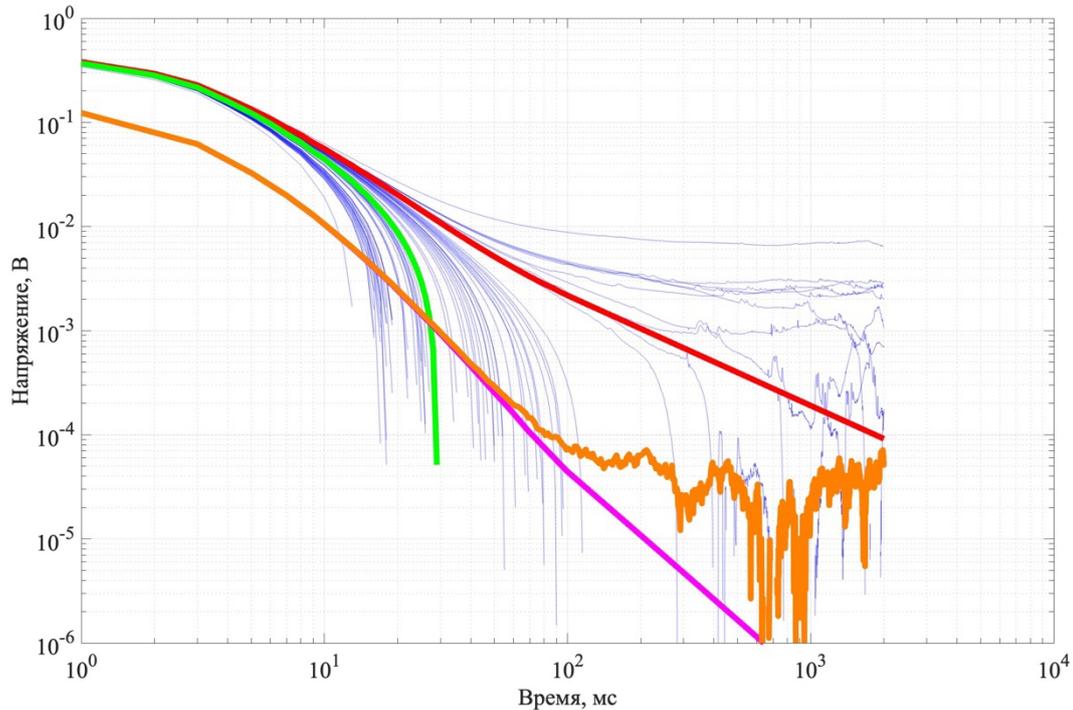


Рисунок 3.7 – Результаты восстановления ПХ и ИПХ по синтетическим зашумленным данным: Верхнее семейство графиков: синяя кривая – исходная переходная характеристика; зеленая кривая – восстановленная ПХ после применения метода накопления (импульсы длительностью 4 секунды, время зондирования 64 секунды). Нижнее семейство графиков: фиолетовая кривая – исходная импульсная переходная характеристика; Оранжевая кривая – восстановленная ИПХ методом ШПС (импульсы длительностью 2 мс, время зондирования 64 секунды).

Результаты численного моделирования на основе синтетически-зашумленного полезного сигнала свидетельствуют о преимуществе применения псевдослучайных последовательностей по сравнению с традиционным режимом накопления. Так, максимальное абсолютное отклонение переходной характеристики, восстановленной методом накопления, достигает 40 %, тогда как при использовании метода, основанного на ШПС, оно не превышает 10 % на тех же временных интервалах (рис. 3.8).

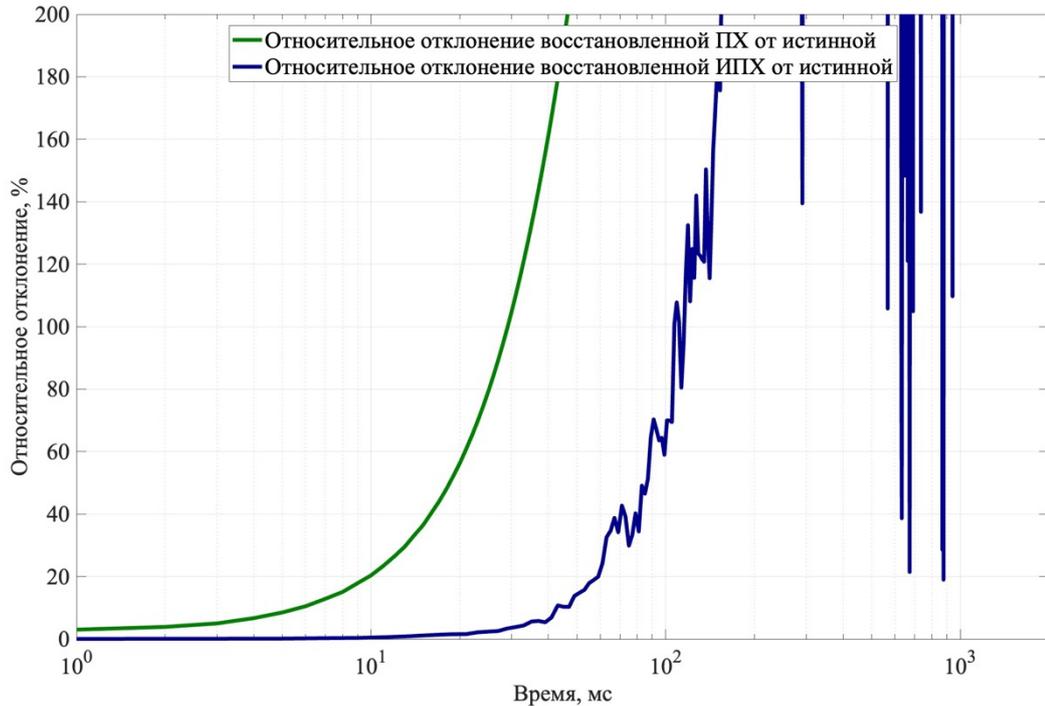


Рисунок 3.8 – Кривые относительных погрешностей восстановления ПХ и ИПХ: темно-зеленая кривая — относительное отклонение восстановленной переходной характеристики, полученной методом накопления (импульсы длительностью 4 секунды, время зондирования 64 секунды), от исходной кривой кажущегося сопротивления; темно-синяя кривая — относительное отклонение восстановленной импульсной переходной характеристики, полученной методом ШПС при зондировании в течение 64 секунд, от исходной импульсной переходной характеристики.

Таким образом, описанные выше искажающие факторы требуют усовершенствования методов регистрации и обработки сигналов ЗС, которые позволили бы улучшить соотношение сигнал/шум в области поздних времен становления и продлить интерпретируемый сегмент измеренной переходной характеристики.

### §3.2 Анализ характерных шумов и полезного сигнала в условиях морского зондирования становлением поля на основе экспериментальных данных

Применение псевдослучайных кодовых последовательностей в качестве сигнала источника для зондирования становлением поля в ближней зоне показало хорошие результаты на рассмотренных ранее синтетических моделях полезного сигнала и помехи, задаваемой в форме Гауссовского шума [Алексеев и др., 2024]. В то же время, вопрос эффективности такого подхода применительно к рассматриваемой системе наблюдения и геоэлектрическим условиям, характерным для работ на Арктическом шельфе, требует дополнительного исследования. В настоящем параграфе выполняется анализ данных, полученных в рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" АМК-82, организованном Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН и ТОИ им. Ильичева ДВО РАН в 2022 г. с целью картирования подводной мерзлоты в акватории моря Лаптевых. На основе записей электрического поля, полученных в рейсе АМК-82, была составлена библиотека шумовых сигналов, а также построены усредненные кривые становления поля (переходные характеристики), используемые в дальнейшем для оценки помехоподавления в режиме зондирования с псевдослучайными последовательностями импульсов тока.

Рисунок 3.9 иллюстрируют примеры сигналов ЗСБ, зарегистрированных в режиме импульс/пауза (длительностью 2 с/2 с) в процессе движения судна с системой наблюдения со средней скоростью около 5-7 узлов.

Для последующего анализа и выделения шумовой составляющей использовался набор записей сигнала становления поля в режиме накопления с шагом дискретизации 1 мс, полученных в различных районах моря Лаптевых. Поведение полезного сигнала на всех записях было близким к представленному на рисунке 3.2. Выделение шума осуществлялось путем выбора фрагментов сигнала в паузах в интервале времен становления 100 мс – 2 с, а также в аналогичных интервалах при пропуске тока. Последние затем корректировались путем вычитания среднего значения сигнала в период пропуска тока для соответствующего импульса. На заключительном этапе все фрагменты из единой

записи объединялись в соответствующие временные ряды с интерполяцией незаполненных интервалов и сглаживанием стыков между ними. Примеры построенных рядов длительностью в несколько часов приводятся на рисунке 3.10.

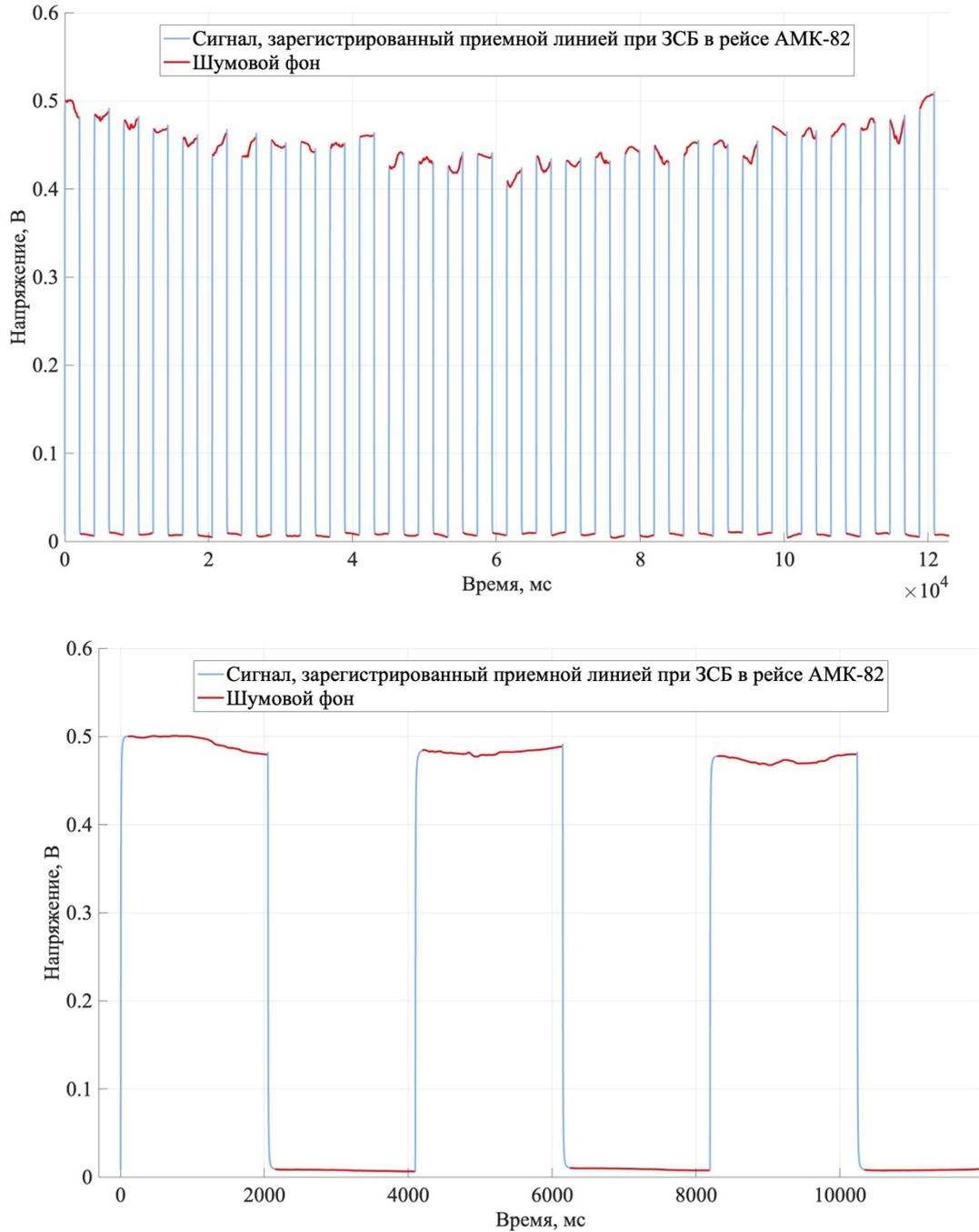


Рисунок 3.9 – Фрагменты сигнала длительностью 2 мин (вверху) и 12 с (внизу), зарегистрированного в рейсе АМК-82. Красным цветом маркированы участки сигнала во время пропускания тока и в паузе, искаженные влиянием шумов.

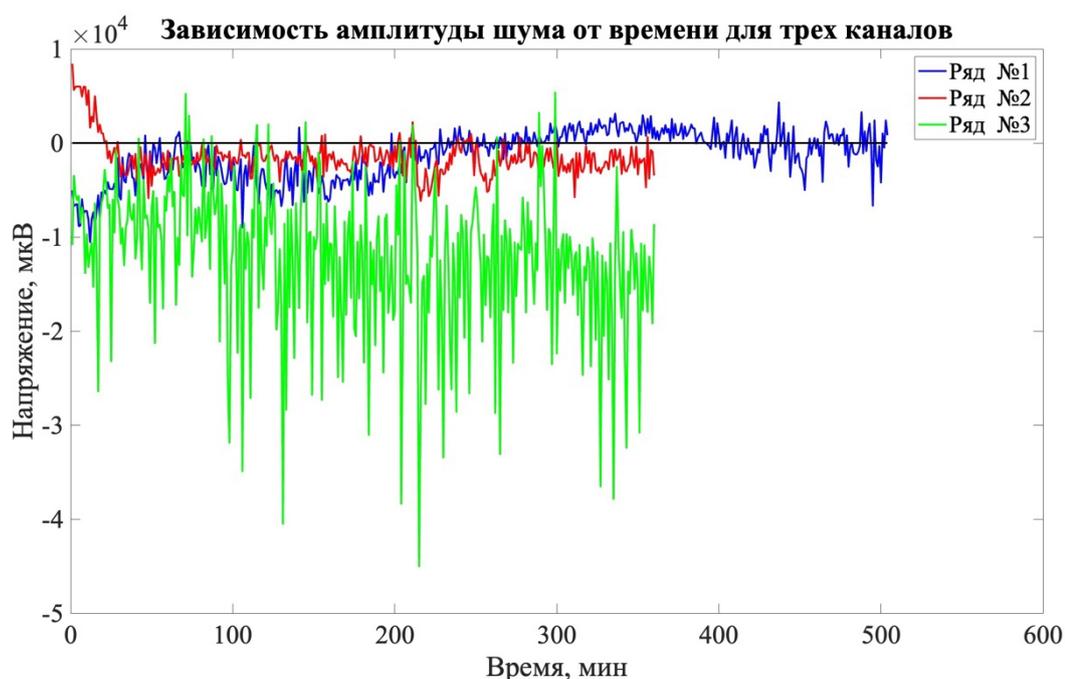


Рисунок 3.10 – Примеры рядов шума, построенные на основе экспериментальных записей сигнала ЗСБ.

Рисунок 3.11 отражает типичную короткопериодную и длиннопериодную динамику шумового сигнала, а также распределения его амплитуд, близкое к нормальному. С учетом этих особенностей для последующего зашумления полезного сигнала был выбран определенный временной отрезок рассмотренного ряда (рис. 3.12).

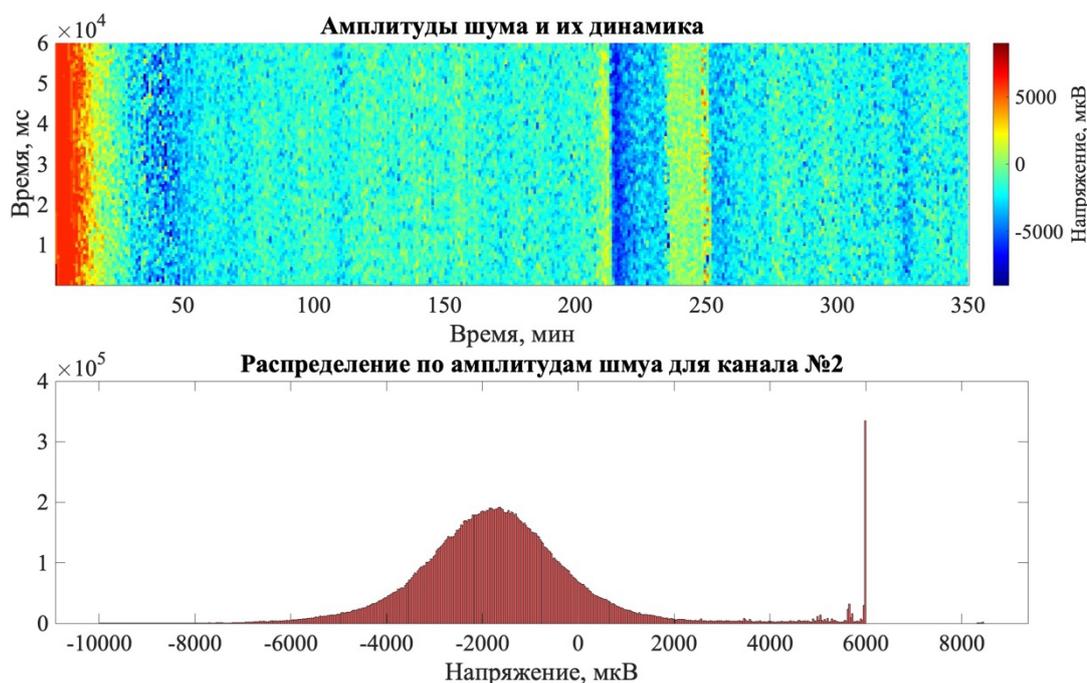


Рисунок 3.11 – Верхняя панель: изображение короткопериодной (вертикальная ось) и длиннопериодной (горизонтальная ось) динамики шума; Нижняя панель: гистограмма амплитуды.

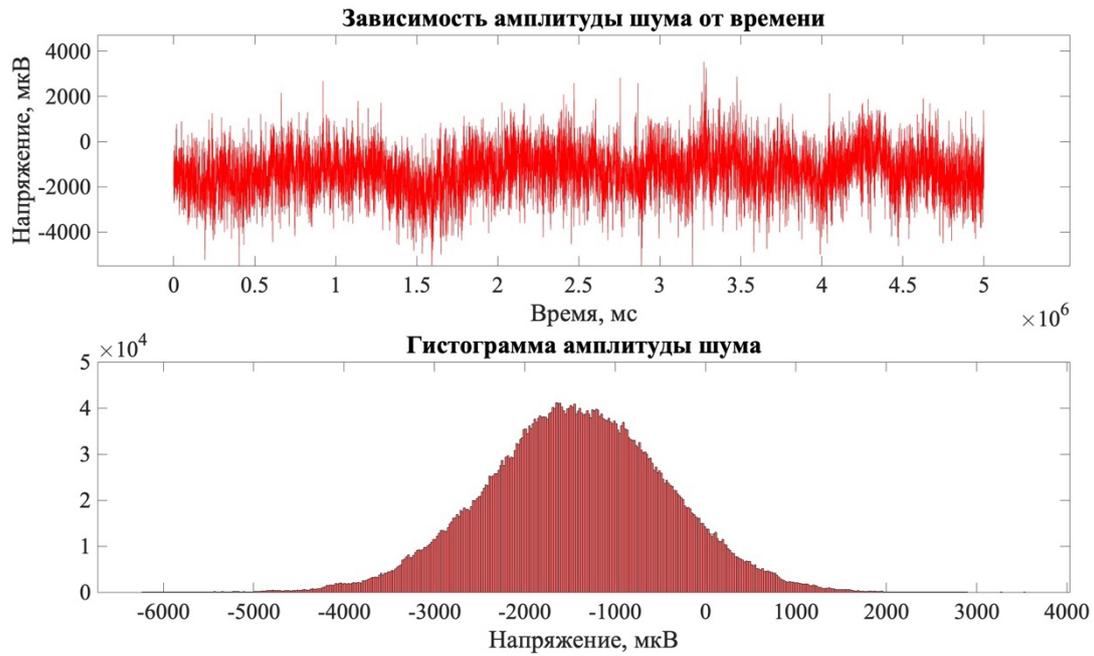


Рисунок 3.12 – Фрагмент шумового сигнала, отобранный для зашумления синтетических данных (вверху) и соответствующая гистограмма значений сигнала (внизу).

Для последующего анализа эффективности режима ШПС на основе экспериментально-зарегистрированных в режиме накопления сигналов была также построена усредненная кривая становления поля (полезный сигнал), характерная для геоэлектрических условий мелководного шельфа моря Лаптевых. При построении такой кривой использовалась серия сигналов в интервале времен становления 1–100 мс, в котором искажения полезного сигнала минимальны, с последующим расчетом средней кривой. В диапазоне времен 100 мс – 2 с усредненная кривая экстраполировалась синтетической ветвью с временной зависимостью  $t^{-\frac{3}{2}}$  и сглаживалась с использованием сплайн-аппроксимации (рис. 3.13).

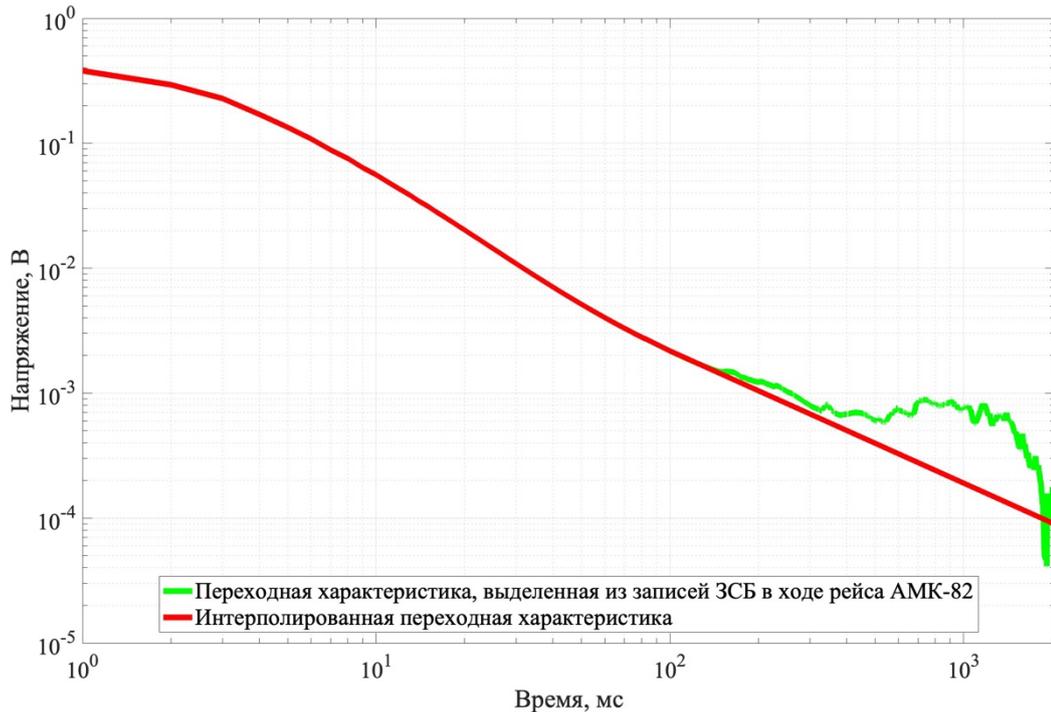


Рисунок 3.13 – Построение полусинтетической кривой становления (переходной характеристики) на основе экспериментальных данных. Зелёная кривая — переходная характеристика, выделенная из экспериментальных записей ЗСБ. Красная кривая — результирующая переходная характеристика, принятая за эталонную для последующего моделирования.

Для построения кривой, отвечающей импульсу заданной длительности (вплоть до длительности, равной одному дискрету сигнала), т.е., импульсной ПХ (ИПХ), из полученной ПХ вычиталась ее копия, сдвинутая по времени на  $n$  отсчётов, в зависимости от требуемой длительности импульса:

$$\text{ИПХ}_n = \text{ПХ}(t) - \text{ПХ}(t - n) \quad (3.1)$$

где  $n$  — длительность импульса для ИПХ,  $t$  — время становления после выключения тока.

Пример ИПХ для импульса длительностью 2 мс представлен в виде фиолетовой кривой на рисунке 3.14. Как видно из рисунка, скорость убывания ИПХ оказывается существенно выше по сравнению с ПХ (закон убывания близок к  $t^{-\frac{5}{2}}$ ).

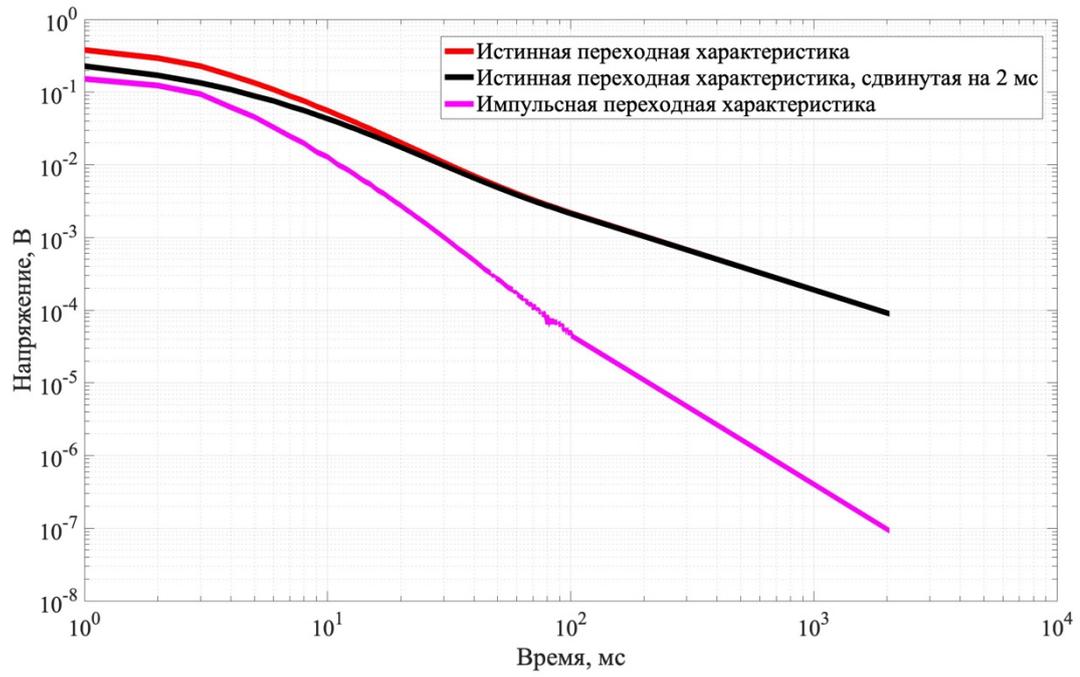


Рисунок 3.14 – Построение импульсной переходной в соответствии с (2.1). Красная кривая — интерполированная переходная характеристика, чёрная кривая — интерполированная переходная характеристика, сдвинутая на 2 мс, фиолетовая кривая — импульсная переходная характеристика, соответствующая импульсу 2 мс.

### §3.3 Сравнительный анализ эффективности помехоподавления в режимах накопления и ШПС в условиях морского зондирования становлением поля

Для анализа эффективности использования псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСКП) токовых импульсов с точки зрения снижения уровня шумов и сопоставления их с результатами, получаемыми при классическом накоплении, была проведена серия моделирований, имитирующих сигналы зондирования с различной длительностью импульсов. На основе сгенерированных ШПС-сигналов, дополненных реальными шумовыми компонентами, была выполнена реконструкция импульсной переходной характеристики (ИПХ), а также произведён количественный анализ её отклонения от эталонных (истинных) значений [Гончаров и др., 2022].

На первом этапе моделирования, опираясь на данные, полученные в экспедиции АМК-82 методом ЗС, была выбрана эталонная переходная характеристика (ПХ), отражающая типовой геоэлектрический разрез южной акватории моря Лаптевых при среднем уровне глубины порядка 15–17 м. Указанная ПХ была сформирована в интервале времен становления от 1 мс до 2 с на основе усреднения множества индивидуальных кривых в диапазоне ранних времен (до 70 мс) и последующей экстраполяции в логарифмических координатах при помощи кусочно-линейной аппроксимации. Для сглаживания использовался кубический сплайн. Исходя из этой эталонной кривой, были рассчитаны ИПХ для импульсов с длительностью 2 мс и 16 мс [Гончаров и др., 2022]. Детали построения синтетических ПХ и ИПХ были изложены в предыдущем разделе.

В рамках второго этапа были сгенерированы ПСКП в виде двоичных M-последовательностей, представленных наборами прямоугольных импульсов с равной вероятностью знака. Их генерация осуществлялась с применением алгоритма, основанного на математике конечных полей Галуа и принципах линейных сдвиговых регистров [Zepernick, Finger, 2005]. Рассматривались два варианта: последовательности длиной  $2^{12}$  (с шагом 16 мс) и  $2^{15}$  (с шагом 2 мс), при

этом суммарная длительность в обоих случаях составляла приблизительно одну минуту (65,536 с).

Сигнал, регистрируемый в ответ на токовое воздействие  $m(t)$ , описывался через свёрточное соотношение с импульсной характеристикой среды. Для каждой М-последовательности вычислялась соответствующая свёртка с модельной ИПХ, учитывающей заданную длительность элементарного импульса. Полученные сигналы использовались как основа для имитации зарегистрированных откликов. Для оценки шумоустойчивости в свёрточное уравнение дополнительно вводилась аддитивная шумовая компонента  $n(t)$ , добавляемая в левую часть [Гончаров и др., 2022].

$$s_n(t) = s(t) + n(t) = m(t) * h_n(t) \quad (3.2)$$

где шум  $n(t)$  извлечен из записей сигнала в рамках рейса АМК-82 (рис. 3.12).

С целью сравнения с традиционным подходом был смоделирован сигнал в режимах накопления с однополярными и разнополярными импульсами с паузами длительностью 2 с (рис. 3.15а,б). Синтетические ШПС-сигналы в сопоставлении с наложенным шумом показанным с 50-кратным увеличением по амплитуде (рис. 3.15в,г).

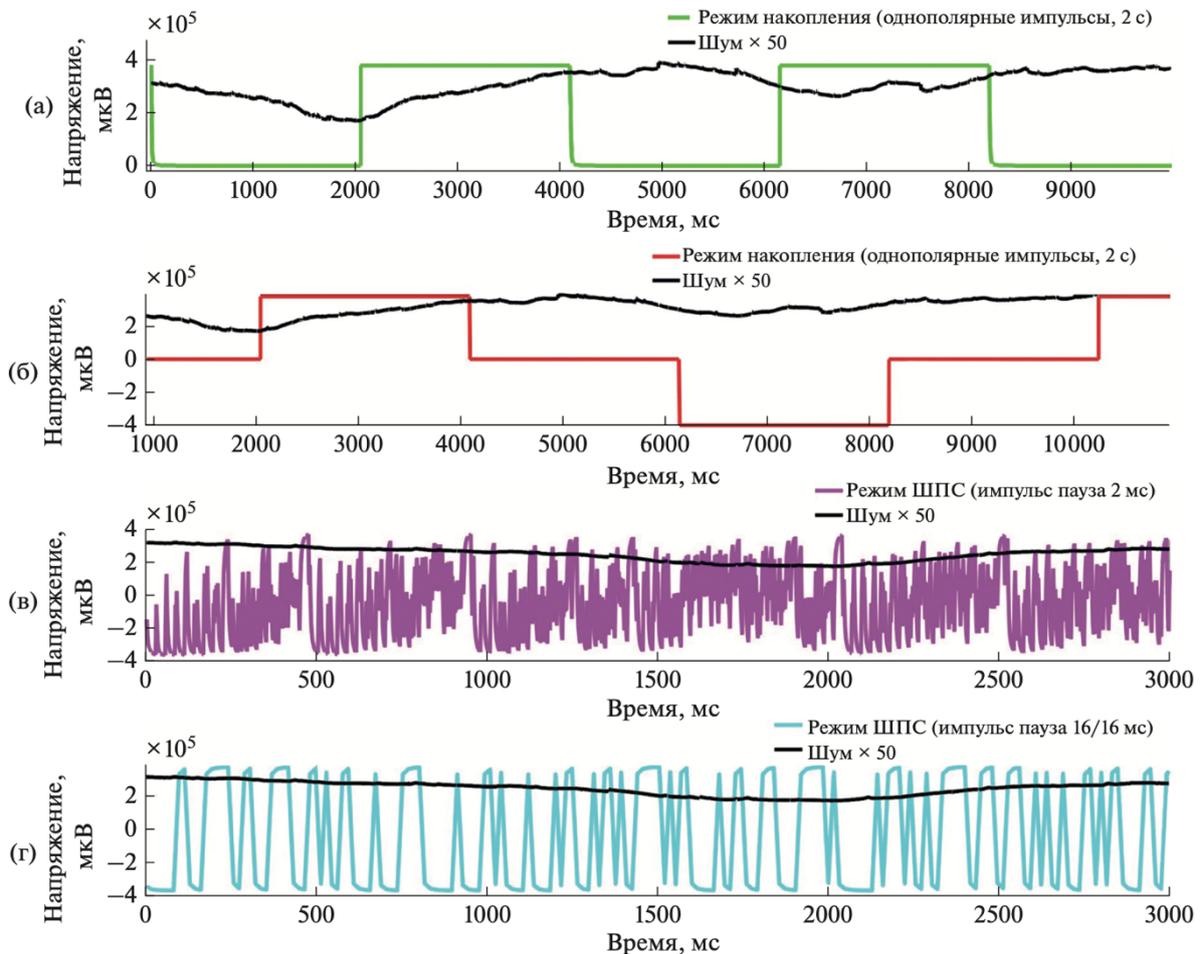


Рисунок 3.15 – Фрагменты сигналов, зарегистрированных в приемной линии при различных режимах накопления: зеленая кривая соответствует накоплению с однополярными импульсами и паузами по 2 секунды (а), красная — накоплению с разнополярными импульсами (б). Сиреневая и голубая кривые отображают сигналы, полученные в режиме ШПС с импульсами длительностью 2 мс и 16 мс соответственно (в, г). Черные кривые представляют аддитивный шум, амплитуда которого увеличена в 50 раз для наглядности.

Результаты восстановления переходных характеристик по зашумленным синтетическим данным в режимах накопления и ШПС представлены на рисунке 2.16 (для одной реализации шума). Видно, что в режиме ШПС средняя погрешность ИПХ при длительности, эквивалентной 16-кратному накоплению (импульс/пауза 2 с/2 с), снижена примерно на два порядка. Однако уровень полезного сигнала (восстанавливаемой ИПХ) также оказывается ниже по сравнению с ПХ, полученной в режиме накопления на длинном импульсе.

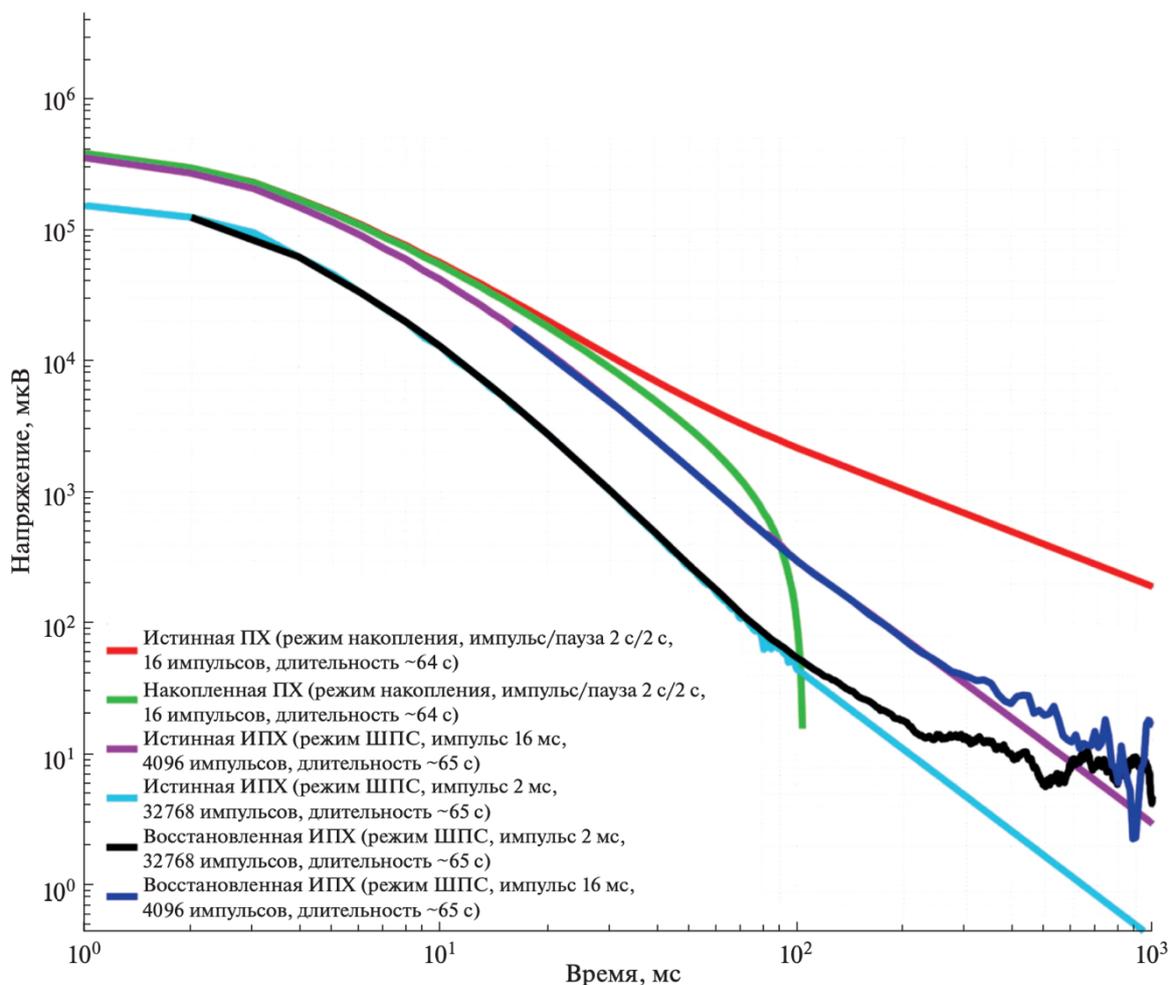


Рисунок 3.16 – Сравнение восстановленных кривых становления поля в режимах накопления и ШПС по зашумленным данным длительностью 65 с. Данные синтезированы методом свертки последовательности токовых импульсов, истинной переходной характеристики среды и аддитивного шума (использован единый фрагмент шумовой записи для всех случаев). Красная и светло-зеленая кривые представляют истинную и восстановленную ПХ в режиме накопления с однополярными импульсами (импульс/пауза 2 с/2 с, 16 накоплений). В режиме ШПС показаны два варианта: для импульсов 16 мс (~4 тыс. импульсов) — сиреневая кривая (истинная) и синяя (восстановленная ИПХ); для импульсов 2 мс (~32 тыс. импульсов) — голубая кривая (истинная) и черная (восстановленная ИПХ).

Кривые на рисунке 3.16 показывают значительные различия в уровне погрешности для разных режимов зондирования. Так, ПХ в режиме накопления, усредненная по 16 реализациям с одинаковой полезной составляющей, но разными 2-секундными сегментами шума, демонстрирует заниженные значения (светло-зеленая кривая), отклоняясь от истинной кривой (красная линия) и уходя в отрицательную область на временах около 30–40 мс.

Наилучшие результаты по увеличению длины регистрируемой кривой наблюдаются в режиме ШПС с импульсами 16 мс (синяя и сиреневая кривые), где точность реконструкции остается приемлемой до 150–200 мс, хотя возникают

сложности на ранних временах становления. Использование ШПС с 2-миллисекундными импульсами показывает хорошие результаты в интервале 2–90 мс (черная и голубая кривые), а с 16-миллисекундными — в диапазоне 16–120 мс.

Для более детального анализа, учитывающего широкий спектр шумовых реализаций, аналогичный численный эксперимент был проведен в двух режимах накопления (с однополярными и разнополярными импульсами длительностью 2 с). В режиме ШПС с импульсами 2 и 16 мс был проведен анализ массива из 100 синтетических зондирований с одинаковым полезным сигналом (истинными ПХ/ИПХ), но с разными сегментами шума, наложенными на имитированный измеренный сигнал. Результаты реконструкции представлены в виде облака разноцветных кривых, где в случае накопления (ПХ) наблюдается систематическое завышение оценок, тогда как в режиме ШПС кривые распределены более равномерно (рис. 3.17).

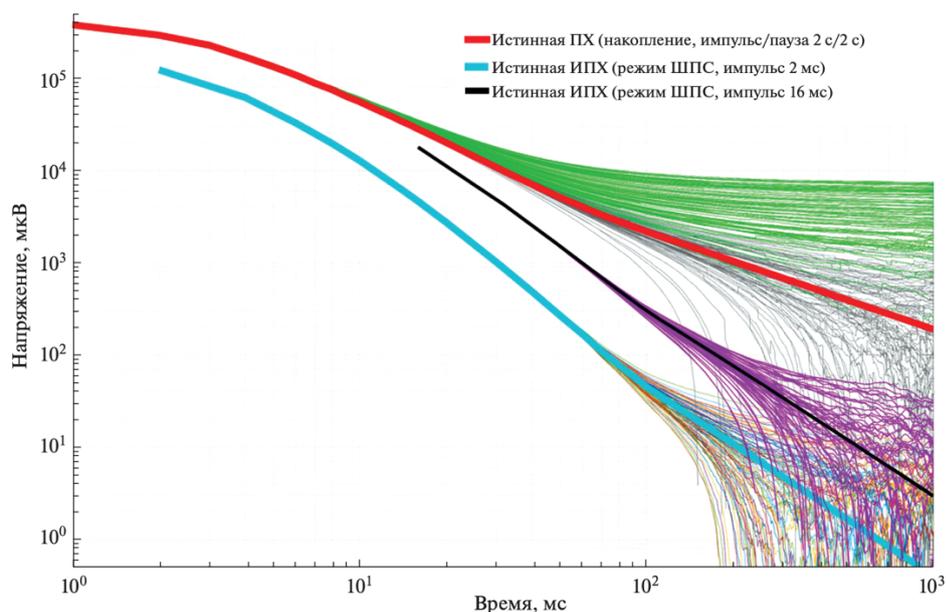


Рисунок 3.17 – Сравнение восстановленных кривых становления поля в режимах накопления (импульс/пауза 2 с/2 с, 16 накоплений) и ШПС (импульсы 2 мс – 32 тыс., 16 мс – 4 тыс.) при одинаковом времени зондирования (65 с). Применено аддитивное зашумление (100 реализаций). Облака светло-зеленых и серых кривых соответствуют накоплению с однополярными и разнополярными импульсами, сиреневые и разноцветные – ШПС. Толстые красная, голубая и черная кривые – истинные ПХ и ИПХ.

Заключительный этап анализа заключался в сравнении всех восстановленных переходных и импульсных переходных характеристик. Для этого был введен

параметр минимизации отклонения, который рассчитывался по следующей формуле:

$$\delta(t) = 100\% \times \frac{|\tilde{h}(t) - h(t)|}{h(t)} \quad (3.3)$$

где  $\tilde{h}(t)$  — восстановленная переходная или импульсная переходная характеристика,  $h(t)$  — эталонная переходная характеристика. Восстановленные и эталонные импульсные характеристики (ПХ или ИПХ) соотносятся через параметр, отражающий степень минимизации отклонений, который вычисляется в соответствии с выбранным методом подавления помех. Расчёты проводились для нескольких вариантов зондирующих сигналов: ШПС с длительностью импульса 16 мс, ШПС с длительностью 2 мс, чередующихся разнополярных импульсов с длительностью и паузой по 2 с, а также традиционного метода с однополярными импульсами и аналогичным временным режимом. На основании вычисленных функций  $\delta(t)$  для каждого метода были построены графики отклонений (рис. 3.18) и псевдорезы относительных отклонений (рис. 3.19) [Гончаров и др., 2022].

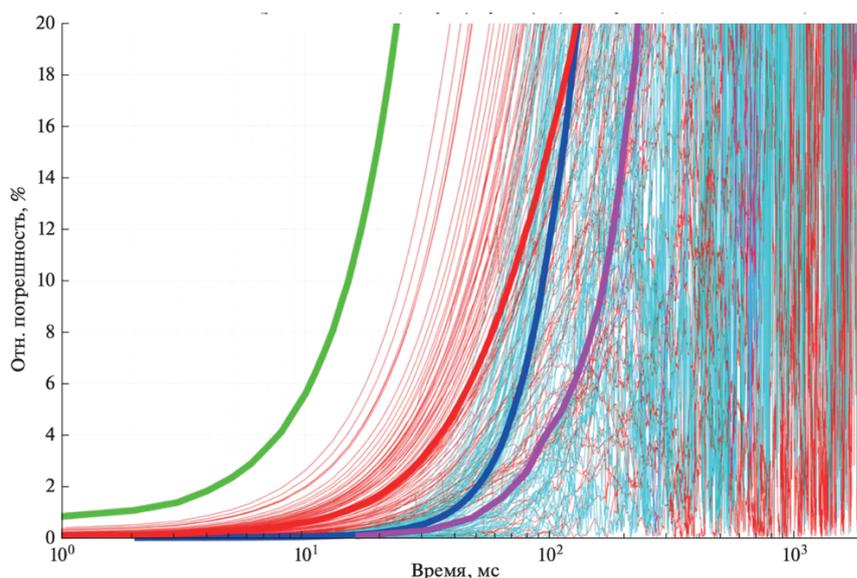


Рисунок 3.18 — Графики относительных отклонений между восстановленными и эталонными импульсными характеристиками: ПХ (в режиме накопления) и ИПХ (в режиме ШПС). Тонкие линии отображают результаты для 100 реализаций шумов: красные — для случая накопления с разнополярными импульсами, голубые — для ШПС с длительностью импульса 2 мс. Толстые линии соответствуют средним значениям погрешностей: зелёная — накопление с однополярными импульсами (2 с), красная — с разнополярными (2 с), синяя — ШПС с импульсами 2 мс, сиреневая — ШПС с импульсами 16 мс.

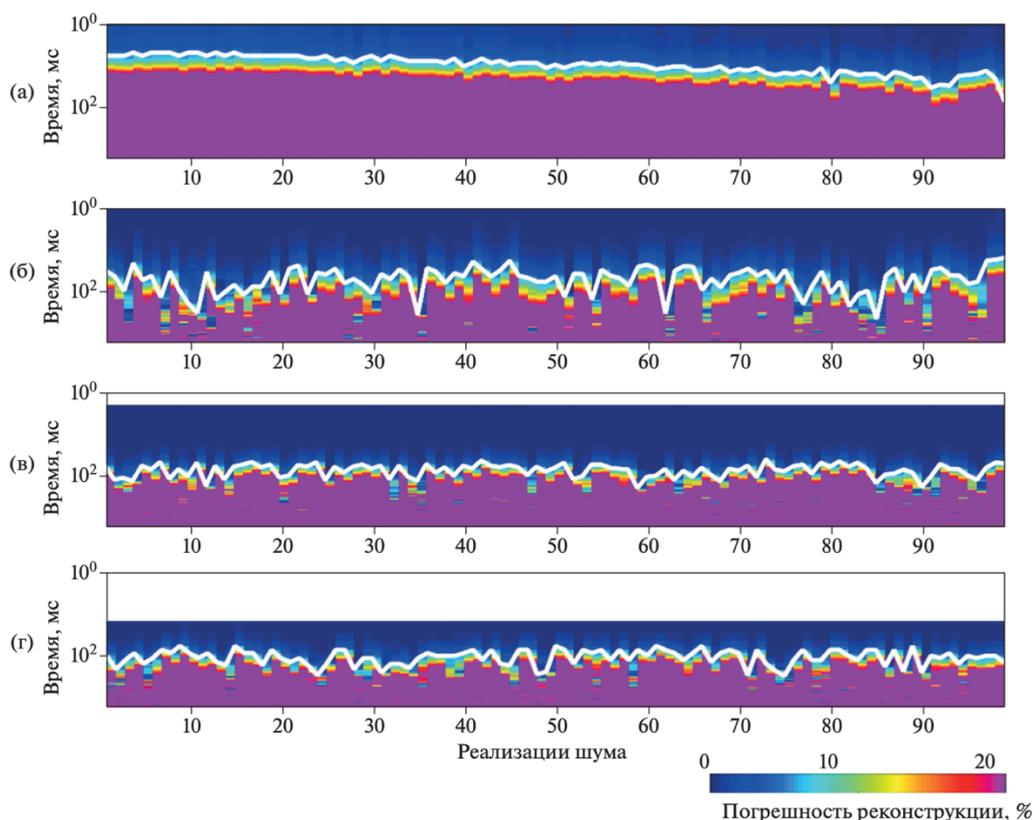


Рисунок 3.19 демонстрирует псевдоразрезы относительных отклонений между восстановленными и эталонными импульсными характеристиками (ПХ), полученными по данным, представленным на рисунке 6, для различных режимов зондирования. Представлены следующие варианты: накопление с однополярными импульсами длительностью 2 с (а), накопление с разнополярными импульсами 2 с (б), использование ШПС с импульсами 2 мс (в), а также ШПС с импульсами 16 мс (г). Белыми линиями на каждом из разрезов указаны предельно достижимые времена регистрации отклика, соответствующие уровню относительной погрешности не более 5% для каждого конкретного режима.

На рисунках 3.18 и 3.19 представлены относительные погрешности полученных кривых во времени. Видно, что в режиме ШПС с 2-миллисекундными импульсами (голубые кривые) рост погрешности с увеличением времени происходит гораздо медленнее, чем при накоплении (красные кривые), оставаясь в пределах нескольких процентов до 80–90 мс. В накопительном режиме с однополярными импульсами этот предел достигается уже на 10 мс, а с разнополярными – на 50–60 мс, что существенно снижает надежность геоэлектрической интерпретации. В режиме ШПС с 16-миллисекундными импульсами погрешность возрастает еще медленнее, достигая порога 5% лишь на 110–120 мс (сиреневая кривая на рис. 3.18), что подтверждает его более высокую эффективность по сравнению с накоплением. Среднее значение предельно-достижимого времени становления, отвечающего погрешности 5%, для рассмотренного набора реализаций шума в режиме накопления с однополярными импульсами составляет порядка 10 мс, с разнополярными импульсами – около 50 мс, в режиме ШПС с импульсами 2 мс – порядка 85 мс, с импульсами 16 мс – около 110 мс.

Приведенные выше результаты показывают, что метод ШПС значительно снижает погрешности реконструкции переходных характеристик по сравнению с традиционным методом накопления.

### §3.4 Сравнительный анализ эффективности применения периодических сигналов, модулированных псевдослучайным кодом

В предыдущем параграфе было проведено численное моделирование данных ЗСБ с использованием псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСКП), подтвердившее высокую эффективность последних в условиях значительных шумовых искажений, типичных для арктических морских исследований. Результаты показали, что применение ПСКП в качестве управляющих сигналов обеспечивает более точную реконструкцию переходной характеристики среды по сравнению с традиционными режимами накопления. Однако остаётся не до конца исследованным вопрос выбора оптимальной ПСКП для наиболее эффективного подавления шума при типичных условиях зашумления.

Для оценки эффективности различных псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСКП) была использована квазидвумерная модель геоэлектрического разреза (рис. 3.20а), отражающая типичное строение донных осадков шельфовой зоны моря Лаптевых. Модель включает многолетнемерзлый слой, а также характерный батиметрический профиль, воспроизводящий геоморфологические особенности региона [Alekseev et al., 2023; Алексеев и др., 2024; Кошурников и др., 2024]. При построении разреза учитывались данные предыдущих полевых наблюдений и теоретических исследований, выполненных в данном районе [Кошурников, 2020; Krylov et al., 2023].

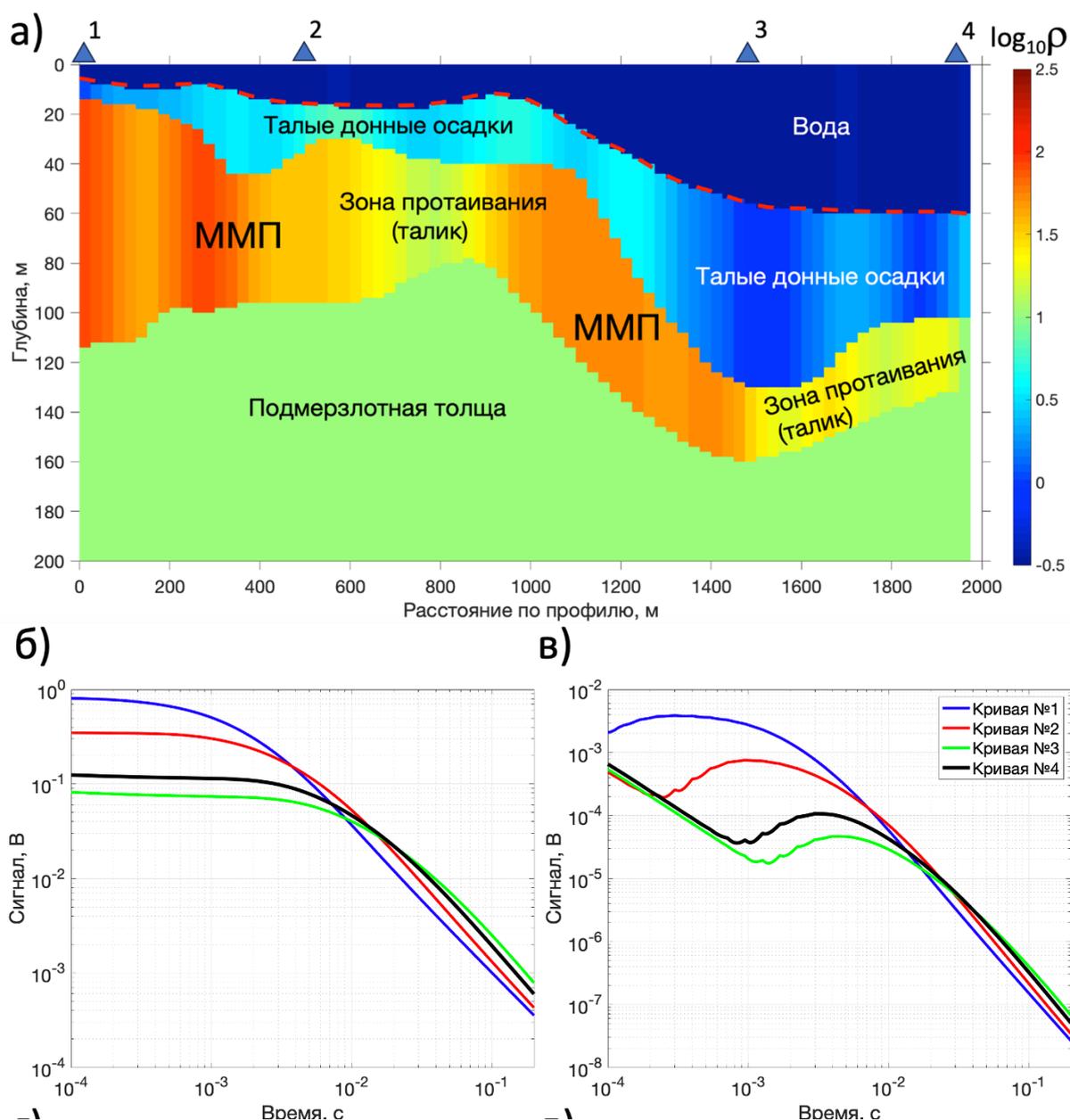


Рисунок 3.20 – а – синтетическая модель, иллюстрирующая типовое геоэлектрическое строение шельфа моря Лаптевых, включая многолетнемёрзлый слой и характерный профиль батиметрии (по [Alekseev et al., 2023; Кошурников и др., 2024], с модификациями); б, в – расчётные кривые становления поля в ответ на ступенчатое выключение тока (б) и на короткий (10 мкс) импульс (в) для четырёх условных пунктов зондирования. Цифрами 1–4 обозначены положения условных пунктов зондирования и построенные для них кривые становления поля.

Для проведения численного анализа были выбраны четыре характерных положения измерительной установки, отражающих существенно различающиеся вертикальные распределения геоэлектрических параметров (обозначены треугольниками 1–4 на рисунке 3.20а [Алексеев и др., 2024]). Для каждого из них были рассчитаны синтетические отклики метода зондирования становления поля (ЗСБ) в конфигурации морской буксируемой диполь-дипольной системы. Расчёты выполнялись с использованием модифицированной версии программного

комплекса DIPOLE1D [Key, 2009; Krylov et al., 2023], адаптированной под морские условия и специфику рассматриваемых моделей. Полученные временные зависимости (рис.3.20б) представляют собой функции становления соосной компоненты напряжённости электрического поля в ответ на ступенчатое отключение питающего тока [Алексеев и др., 2024].

Для последующего применения в процедуре свёрточной деконволюции рассчитанные кривые были оцифрованы с временным шагом 10 мкс, после чего численно дифференцированы по времени, что позволило получить отклики на короткий (10 мкс) импульс (рис.3.20в).

Формирование управляющих свип-сигналов осуществлялось на основе четырёх бинарных псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСКП), содержащих 16383, 8191, 2047 и 1023 элемента соответственно. Каждый элемент определял интервал протекания тока фиксированной амплитуды ( $\pm 1$ ), при длительности 0.5, 1, 4 и 8 мс. Эти последовательности далее обозначаются индексами А–D. Общая длительность сигнала в каждом случае составляла около 8 с, что соответствует времени прохождения буксируемой установки над участком дна длиной порядка 25 м.

Генерация ПСКП осуществлялась в соответствии с алгоритмом построения М-последовательностей [Светов и др., 2012]. На их основе, с использованием логической схемы, предложенной в [Wischmeyer, 1966], были синтезированы квазисинусоидальные свип-сигналы, отличающиеся периодом несущей частоты и модулируемые соответствующей ПСКП. В каждый момент времени  $t$  значение результирующего сигнала  $m(t)$  определялось как гармоническая функция заданной частоты  $f_c$ , взятая с положительным или отрицательным знаком в зависимости от значения соответствующего элемента последовательности  $P(t)$ :

$$m(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} (\sin(2\pi f_c t) + 1), & \text{при } P(t) = 1 \\ -\frac{1}{2} (\sin(2\pi f_c t) + 1), & \text{при } P(t) = -1 \end{cases} \quad (3.4)$$

На основе ПСКП А были дополнительно сгенерированы модификации свип-сигналов с несущими, имеющими треугольную и пилообразную форму. В свою очередь, на базе ПСКП С был реализован свип-сигнал с линейно изменяющейся во времени частотой в диапазоне от 1 до 2500 Гц. В целях сопоставления с классическим режимом накопления в анализ был включён эталонный сигнал в виде разнополярного меандра с паузой, характеризующийся равной длительностью токовых импульсов и промежутков между ними (по 500 мс). Иллюстрации рассматриваемых ПСКП и соответствующих им свип-сигналов приведены на рисунке 3.21; сводные параметры представлены в таблице (3.1) [Алексеев и др., 2024].

Вариант свип-сигнала	Модулирующая ПСКП	Форма несущей	Период несущей	Число кодовых элементов ПСКП	Длительность кодового элемента ПСКП
A0	А, бинарная, разнополярная (-1; 1)	–	–	16383	500 мкс
A1		Гармоническая	500 мкс		
A2		Гармоническая	250 мкс		
A3		Гармоническая	100 мкс		
A4		Гармоническая	5 мкс		
T1A1		Треугольная	500 мкс		
T2A1		Пилообразная	500 мкс		
B0	В, бинарная, разнополярная (-1; 1)	–	–	8191	1 мс
B1		Гармоническая	500 мкс		
B2		Гармоническая	250 мкс		
B3		Гармоническая	100 мкс		
B4		Гармоническая	5 мкс		
B5		Гармоническая	1 мс		
C0	С, бинарная, разнополярная (-1; 1)	–	–	2047	4 мс
C1		Гармоническая	500 мкс		
C2		Гармоническая	250 мкс		
C3		Гармоническая	100 мкс		
C4		Гармоническая	5 мкс		
C5		Гармоническая	1 мс		
C6		Гармоническая	2 мс		
LC1		Квазигармоническая с линейно изменяющейся частотой	400 мкс – 1 с		
D0	D, бинарная, разнополярная (-1; 1)	–	–	1023	8 мс
D1		Гармоническая	500 мкс		
D2		Гармоническая	250 мкс		
D3		Гармоническая	100 мкс		
D4		Гармоническая	5 мкс		
D5		Гармоническая	1 мс		
D6		Гармоническая	2 мс		
D7		Гармоническая	4 мс		
S	Разнополярный меандр с паузой	–	–	16	500 мс

Таблица 3.1 – Параметры построенных управляющих свип-сигналов

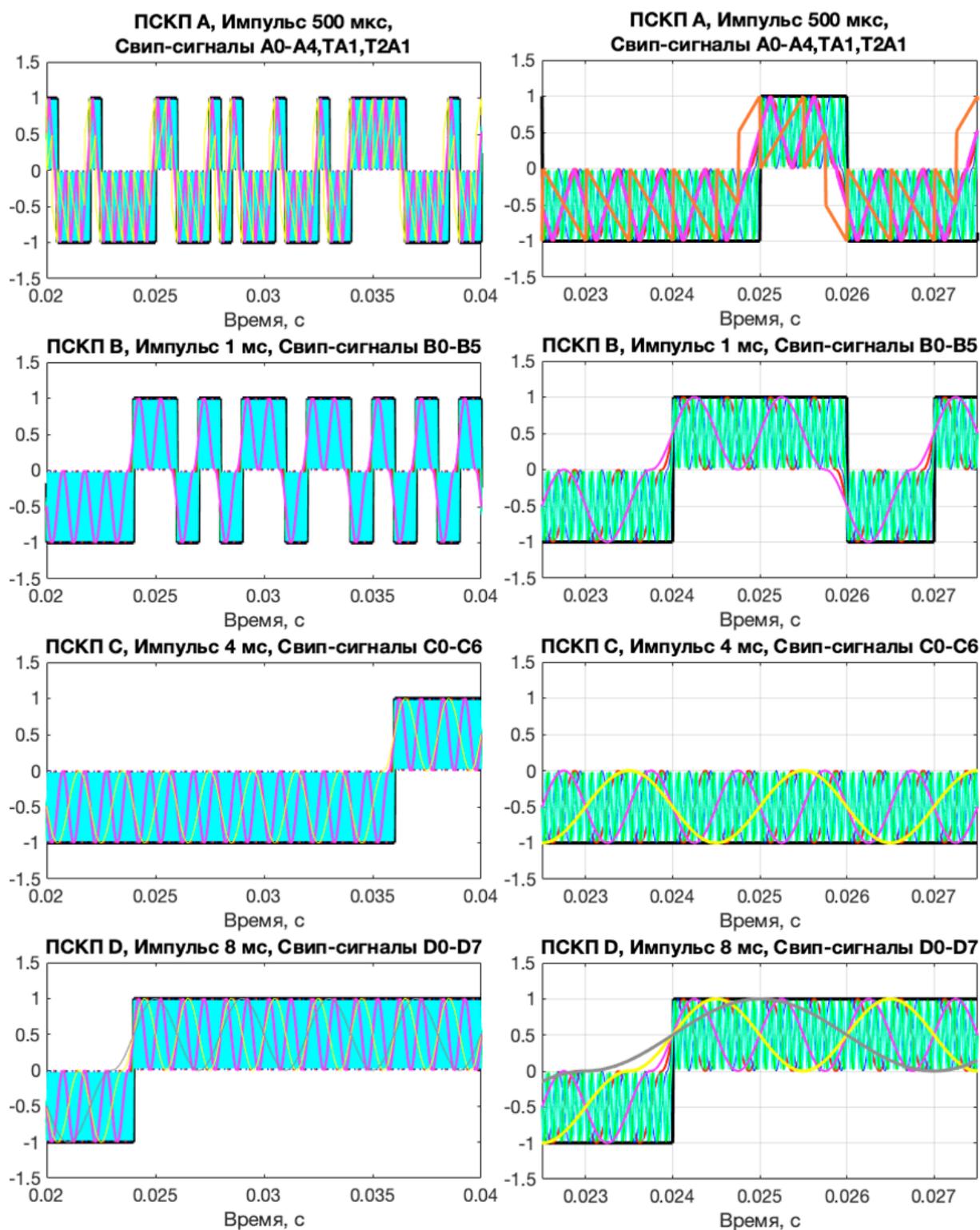


Рисунок 3.21 – Примеры свип-сигналов источника и структура сигналов, использованных для оценки эффективности подавления шумов в морской буксируемой системе импульсной электроразведки; а, в, д, ж — фрагменты сигналов длительностью 20 мс; б, г, е, з — фрагменты длительностью 5 мс; а, б — сигналы, сформированные на основе ПСКП А (длительность кодового элемента 500 мкс): А0–А4, Т1А1, Т2А1; в, г — сигналы на основе ПСКП В (1 мс): В0–В5; д, е — сигналы на основе ПСКП С (4 мс): С0–С6; ж, з — сигналы на основе ПСКП D (8 мс): D0–D7; 1 — базовые ПСКП (А–D); 2–6 — семейства квазигармонических (для ПСКП А–D) и кусочно-линейных (только для ПСКП А) свип-сигналов, полученных путём модуляции несущих различной частоты соответствующими ПСКП в соответствии с алгоритмом [Wischmeyer, 1966].

В соответствии с методикой оценки устойчивости управляющих сигналов к шумовым искажениям, изложенной в предыдущем параграфе, для каждого из анализируемых свип-сигналов источника  $m(t)$  к синтетическим реализациям отклика  $s(t)$  добавлялись шумовые компоненты  $n(t)$ , совпадающие по длительности с полезным сигналом. В качестве шума использовались фрагменты, случайным образом выбранные из реальных морских записей, полученных в ходе экспедиции на шельфе моря Лаптевых [Кошурников и др., 2024]. Примеры шумовых фрагментов, а также их спектральные характеристики представлены на рисунке 3.22. Анализ проводился для нескольких уровней амплитуды шума; в качестве основного рассматривался уровень с среднеквадратичным значением 1 мВ, что соответствует значениям, характерным для реальных условий.

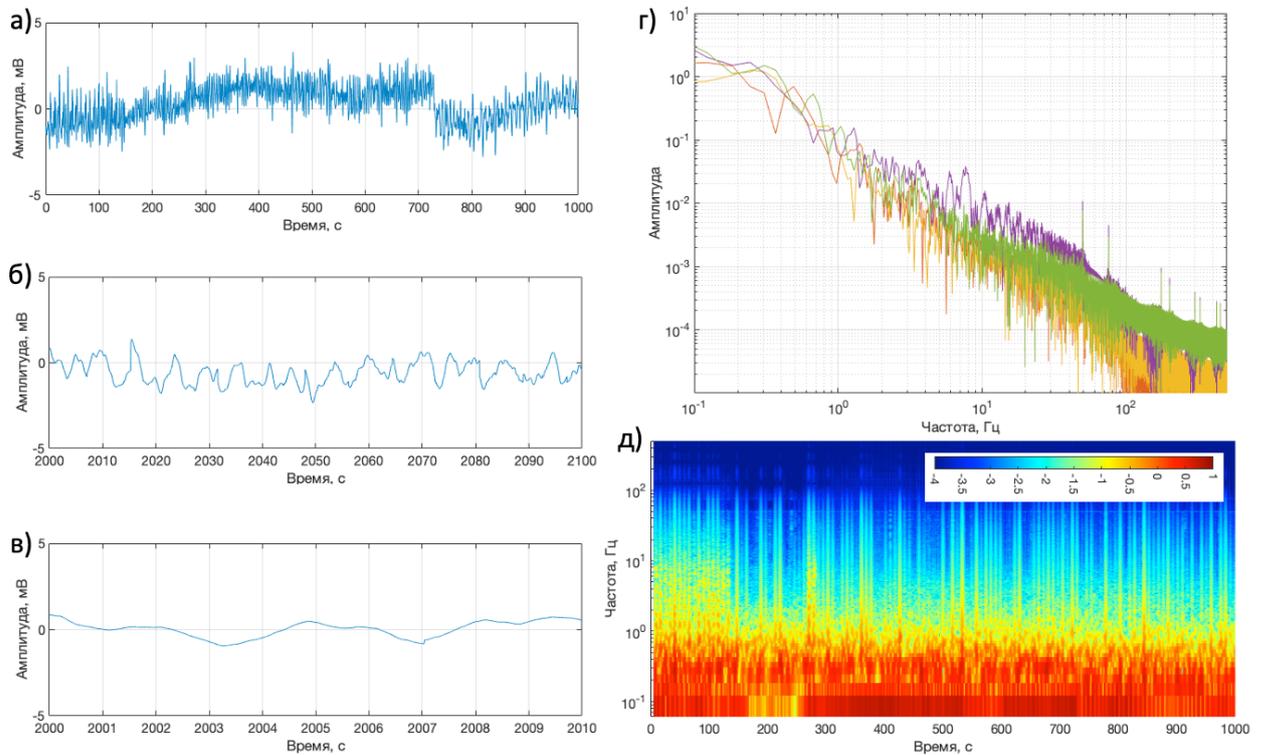


Рисунок 3.22 Характеристики сигнала-помехи по экспериментальным данным [Кошурников и др., 2024]: (а–в) — фрагменты шума различной длительности; (г) — амплитудные спектры нескольких реализаций шума; (д) — спектрограмма.

В целях имитации заведомо неблагоприятных условий исследования рассматривались два уровня зашумления: умеренный, при среднеквадратическом отклонении (RMS) 1–2 мВ, и высокий, с RMS в диапазоне 7–9 мВ, что соответствует двум и десяти кратам характерного амплитудного уровня полезного сигнала соответственно.

На следующем этапе проводилась реконструкция импульсной характеристики  $h(t)$  — отклика на короткий (10 мкс) импульс — по зашумленным ШПС-сигналам  $s_n(t)$  решением уравнения свёртки с применением метода наименьших квадратов (МНК) [Жданов, 2007]. В результате были получены аппроксимированные зашумленные кривые, отражающие восстановленные значения  $h_i(t)$ , по которым вычислялось относительное среднеквадратичное отклонение (RMSE) между восстановленным и эталонным откликами.

$$\text{RMSE}(t) = 100\% * \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left( \frac{\tilde{h}(t_i) - h(t_i)}{h(t_i)} \right)^2} \quad (3.5)$$

Полученное значение относительной среднеквадратической ошибки (RMSE) использовалось для количественной оценки эффективности подавления шума и сравнения качества реконструкции импульсной характеристики  $h(t)$  в зависимости от типа свип-сигнала и конкретной реализации зашумления полезного сигнала  $s(t)$ . В целях сопоставления с традиционным методом накопления дополнительно были рассчитаны отклики на разнополярный прямоугольный меандр с длительностью импульса 500 мс [Алексеев и др., 2024]. Эти отклики усреднялись в паузах между токовыми импульсами с учётом их полярности, после чего сравнивались с истинными кривыми по той же методике, что и сигналы ШПС.

Результаты анализа визуализировались в виде индивидуальных кривых зондирования и соответствующих значений RMSE, позволяющих оценить эффективность различных режимов возбуждения (рис. 3.26–3.28).

Следует отметить, что оценка способности того или иного свип-сигнала к помехоподавлению может быть выполнена и с более общих позиций — на основании анализа его спектральных характеристик. В контексте уравнение свёртки, где  $n(t)$  представляет собой шумовую компоненту измеренного сигнала  $s_n(t)$ , переход в частотную область на основе теоремы о свертке даёт следующее соотношение:

$$M(f)H(f) = S(f) + N(f) \quad (3.6)$$

где  $M(f)$ ,  $H(f)$ ,  $S(f)$ ,  $N(f)$  — Фурье-образы соответствующих временных функций: управляющего сигнала  $m(t)$ , импульсной характеристики среды  $h(t)$ , полезного сигнала  $s(t)$  и шума  $n(t)$ .

На основе уравнения (3.6) оценку  $H(f)$  частотной характеристики среды в присутствии шумов можно записать как:

$$X(f) = H(f) + \Delta H(f) = \frac{S(f)}{M(f)} + \frac{N(f)}{M(f)} \quad (3.7)$$

Анализ выражения (3.7) показывает, что точность восстановления  $H(f)$  напрямую зависит от отношения спектров сигнала-помехи  $N(f)$  и возбуждающего сигнала  $M(f)$  [Алексеев и др., 2024]. При прочих равных условиях, ошибка оценки  $\Delta H(f)$  будет тем меньше, чем выше амплитуда  $M(f)$  в целевом частотном диапазоне. В дальнейшем мы ограничимся анализом амплитудных спектров, поскольку именно они определяют эффективность помехоподавления.

С теоретической точки зрения, оптимальный свип-сигнал мог бы быть получен путём обратного преобразования Фурье от «идеальной» амплитудной частотной характеристики, равномерной и энергетически насыщенной в пределах заданного диапазона частот. Однако на практике реализация таких сигналов ограничена физико-техническими параметрами системы импульсного ЭМ-зондирования: максимальной силой тока, допустимой формой и длительностью импульсов, скоростью фронтов включения/выключения, а также общей продолжительностью измерений.

Для наглядного сопоставления спектральных свойств различных типов сигналов на рисунке 3.23 приведены амплитудные спектры ПСКП и разнополярного меандра, а на рисунке 3.24 — спектры всех исследуемых свип-сигналов, использованных в данной работе.

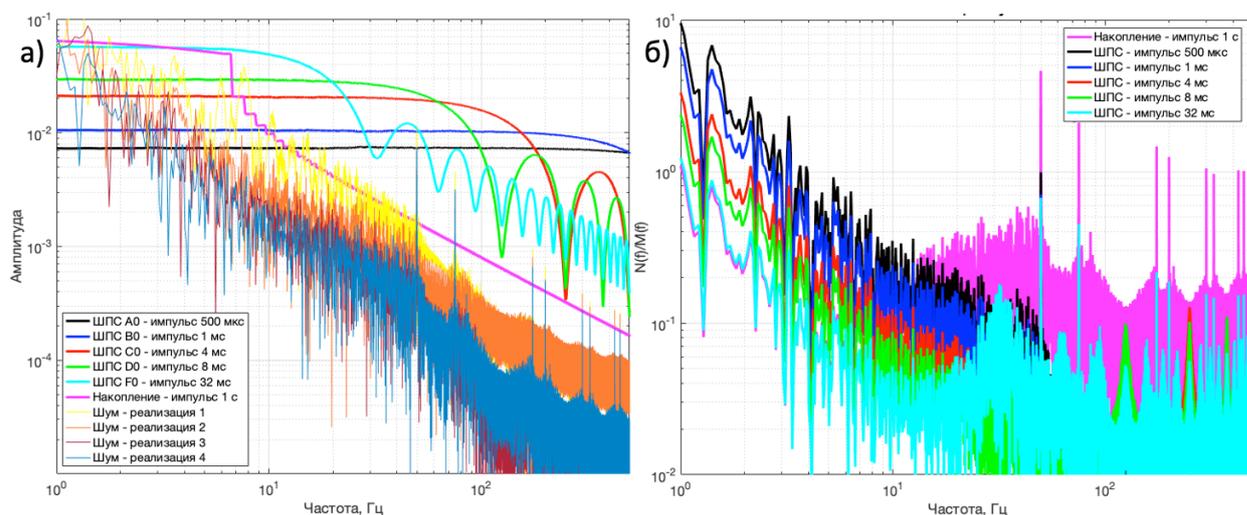


Рисунок 3.23 (а) Амплитудные спектры основных ШПС-сигналов и отдельных реализаций шума; (б) амплитуды отношения спектров шума и ШПС.

Анализ представленных на рисунке 3.23 спектральных характеристик сигналов позволяет выделить ряд типичных закономерностей. Все исследуемые сигналы демонстрируют наличие выраженного основного спектрального лепестка в низкочастотной области, сопровождаемого серией боковых лепестков существенно меньшей амплитуды, величина которых закономерно убывает с ростом частоты (за исключением пиков, соответствующих несущей частоте модулированных сигналов). Между лепестками наблюдаются участки с пониженной амплитудой, формирующие спектральные «провалы».

При этом для ПСКП с более короткой длительностью кодового элемента характерны меньшие значения амплитуд лепестков по сравнению с последовательностями с более длинным элементом. Однако они обеспечивают более широкую полосу основного лепестка, что указывает на преимущественно равномерное распределение энергии по частотному диапазону. Это, в свою очередь, обуславливает относительно более стабильное, но менее интенсивное помехоподавление по сравнению с ПСКП, имеющими более длительные элементы.

Отдельно следует отметить спектральные особенности разнополярного меандра с паузой, применявшегося в качестве эталонного режима накопления. Его спектр характеризуется низкой амплитудой в широком диапазоне частот и резким спадом энергетике с увеличением частоты, что делает его наименее эффективным с точки зрения подавления широкополосных шумов.

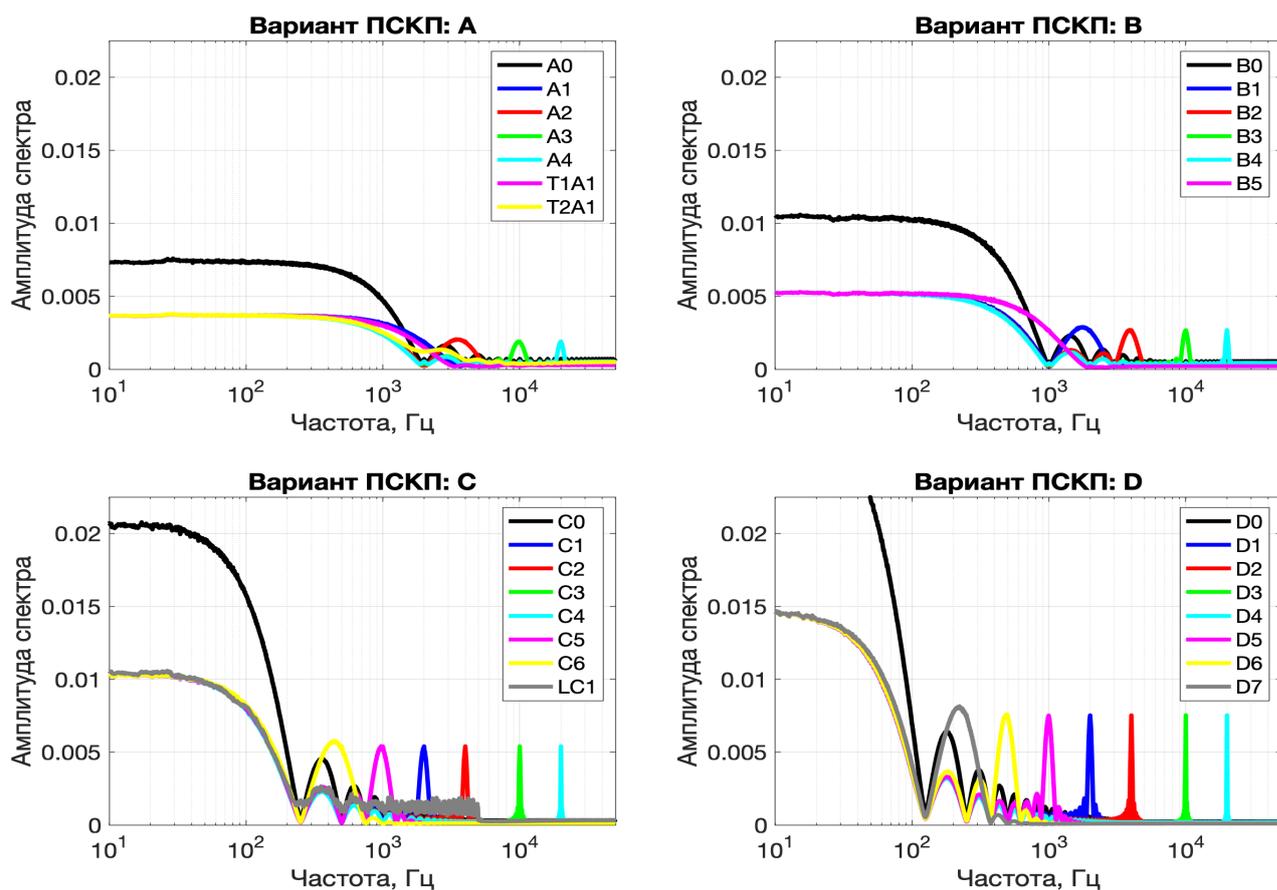


Рисунок 2.24 Амплитудные спектры псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСКП) и сформированных на их основе модулированных свип-сигналов;  
 а — для ПСКП А; б — для ПСКП В; в — для ПСКП С; г — для ПСКП D.

Сравнительный анализ амплитудных спектров исследуемых сигналов (рис. 3.24) свидетельствует о том, что максимальные значения амплитуды основного лепестка характерны для немодулированных бинарных ПСКП (варианты А0, В0, С0, D0). Введение модуляции в квазигармонические сигналы (группы А1–А4, В1–В5, С1–С6, D1–D7) приводит к выраженному снижению амплитуды основного спектрального компонента — в среднем приблизительно в два раза [Алексеев и др., 2024]. Подобное ослабление спектральной концентрации может существенно снижать эффективность таких сигналов в задачах зондирования, ориентированных на устойчивость к внешним помехам.

Аналогичное снижение амплитудного уровня наблюдается в спектрах сигналов с треугольной и пилообразной формой несущей (варианты Т1А1 и Т2А1), что указывает на наличие системных ограничений, обусловленных формой модулирующей функции.

Отдельный интерес представляет сигнал LC1 с линейно изменяющейся во времени частотой несущей. Несмотря на частичное повышение амплитуд в межлепестковых зонах спектра, максимальная спектральная плотность данного сигнала уступает аналогичным показателям квазигармонических вариантов, что ограничивает его применимость в условиях высокоинтенсивных шумов и в задачах, требующих высокой энергетической концентрации в основной полосе.

Во всех рассмотренных случаях отмечается наличие узких спектральных минимумов между основным и первым боковым лепестками. Эти частотные зоны слабой амплитуды не только ухудшают помехоподавление, но также способствуют значительному росту погрешности при деконволюции, даже при умеренном уровне шума. Данный эффект, называемый в работах ряда авторов “структурной помехой” [Бобровский, 2022], проявляется в виде паразитных осцилляций на восстановленных кривых отклика, временной период которых соответствует частоте спектрального минимума и, соответственно, обратно пропорционален длительности кодового элемента ПСКП (рис. 3.25а).

Для устранения подобных искажений была реализована простая, но эффективная процедура фильтрации, основанная на удалении узких временных интервалов сигнала, центрированных вблизи отсчётов, кратных периоду, соответствующему длительности кодового элемента. Внедрение данной методики на этапе постобработки позволило существенно повысить устойчивость процедуры деконволюции и достоверность восстановления импульсных характеристик среды (рис. 3.25б). Кривые, приведённые в последующем анализе (рис. 3.26–3.28), отражают результаты после применения указанной фильтрации и не содержат паразитных осцилляций, обусловленных спектральными минимумами.

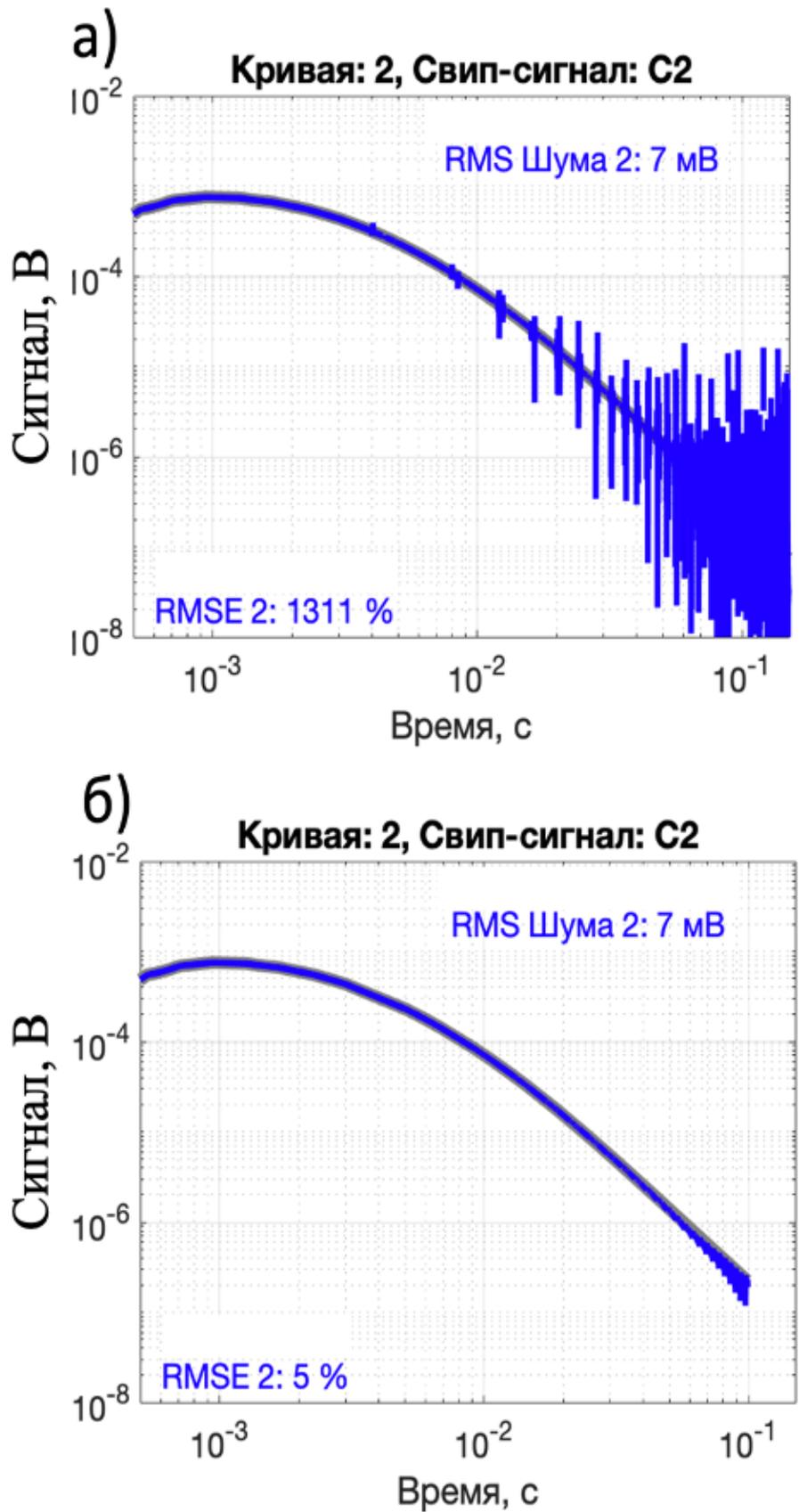


Рисунок 3.25 – а пример восстановленной кривой отклика, полученной в результате деконволюции зашумленных данных при использовании свип-сигнала С2; б – та же кривая после применения фильтрации, заключающейся в удалении 2-миллисекундных интервалов, центрированных с шагом 4 мс, соответствующим длительности кодового элемента ПСКП С.

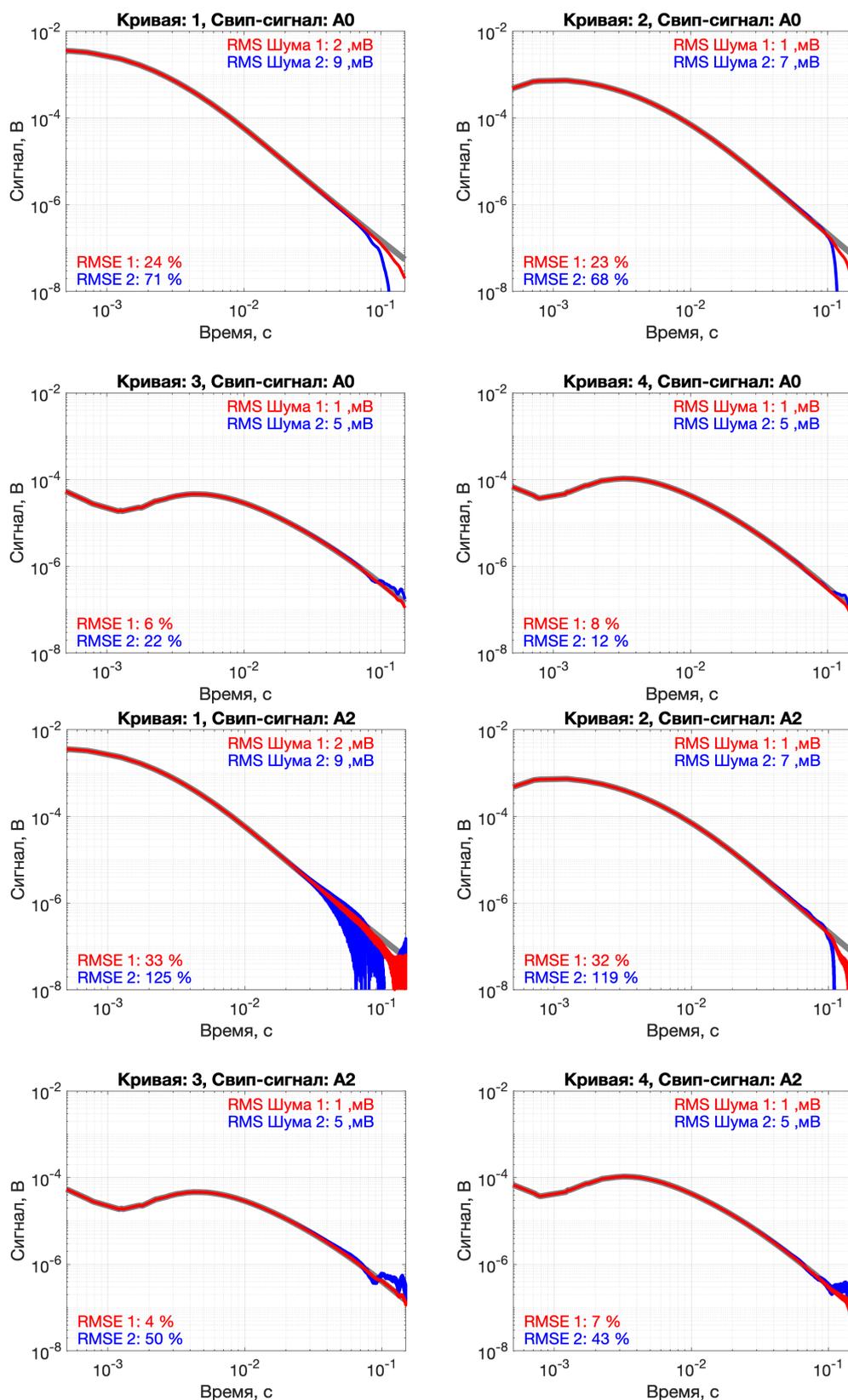


Рисунок 3.26 – Примеры кривых отклика для четырёх пунктов зондирования (рис. 1), восстановленных методом деконволюции на основе свип-сигналов A0 (а-г) и A2 (д-з): а, д — пункт 1; б, е — пункт 2; в, ж — пункт 3; г, з — пункт 4. Обозначения: 1 — эталонные (истинные) кривые; 2 — результаты при уровне зашумления RMS = 1–2 мВ; 3 — при RMS = 7–9 мВ. Указаны значения RMS входного сигнала и RMSE для кривых 2 и 3.

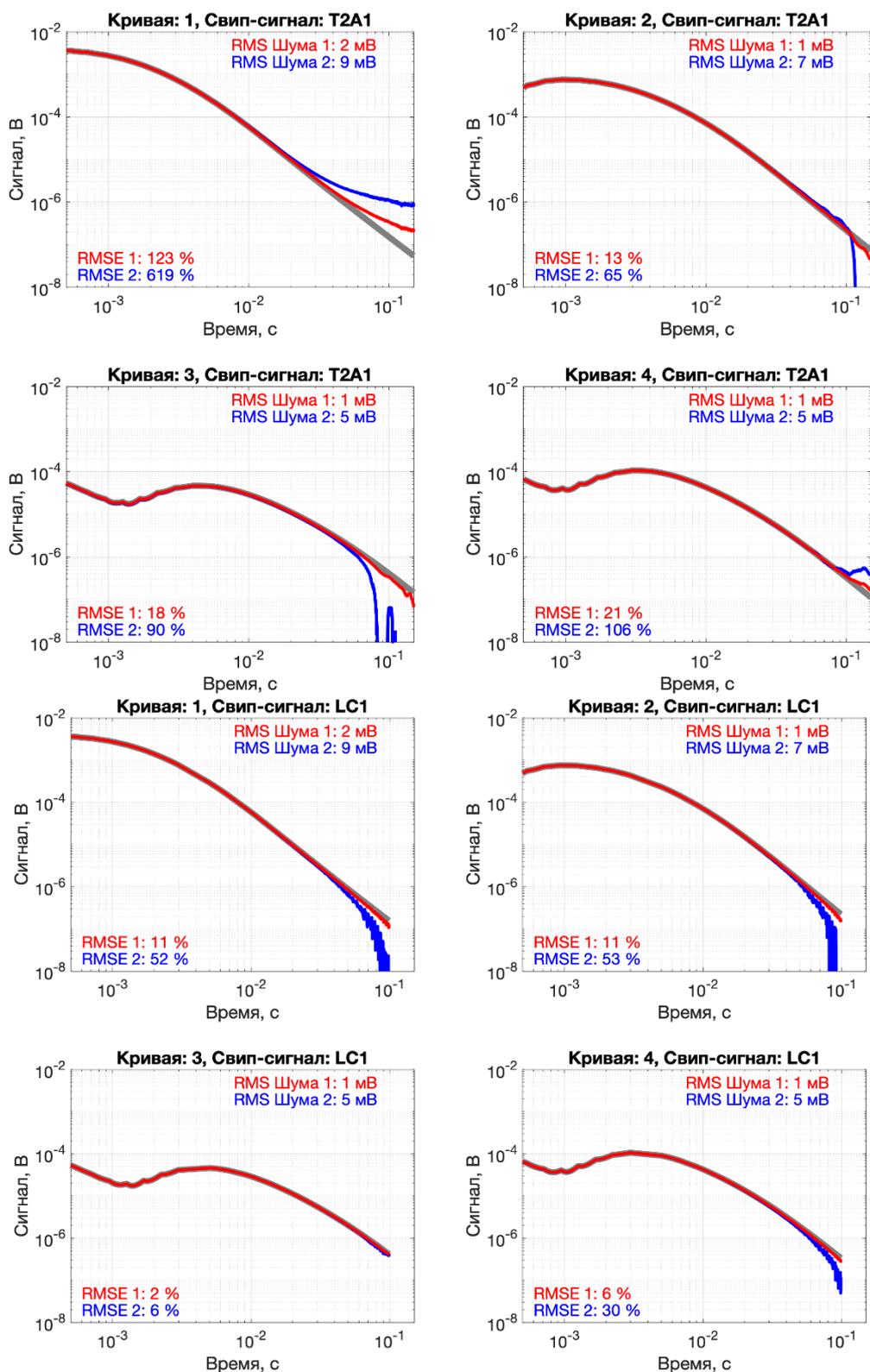


Рисунок 3.27 – Примеры восстановленных кривых отклика для четырёх пунктов зондирования, полученных в результате деконволюции зашумленных данных с использованием свип-сигналов T2A1 (пилообразные импульсы, период 500 мкс, а–г) и LC1 (линейное изменение частоты несущей от 1 до 2500 Гц, д–з): а, д — пункт 1; б, е — пункт 2; в, ж — пункт 3; г, з — пункт 4. Обозначения: 1 — истинные кривые; 2 — результаты при уровне зашумления RMS = 1–2 мВ; 3 — при RMS = 7–9 мВ.

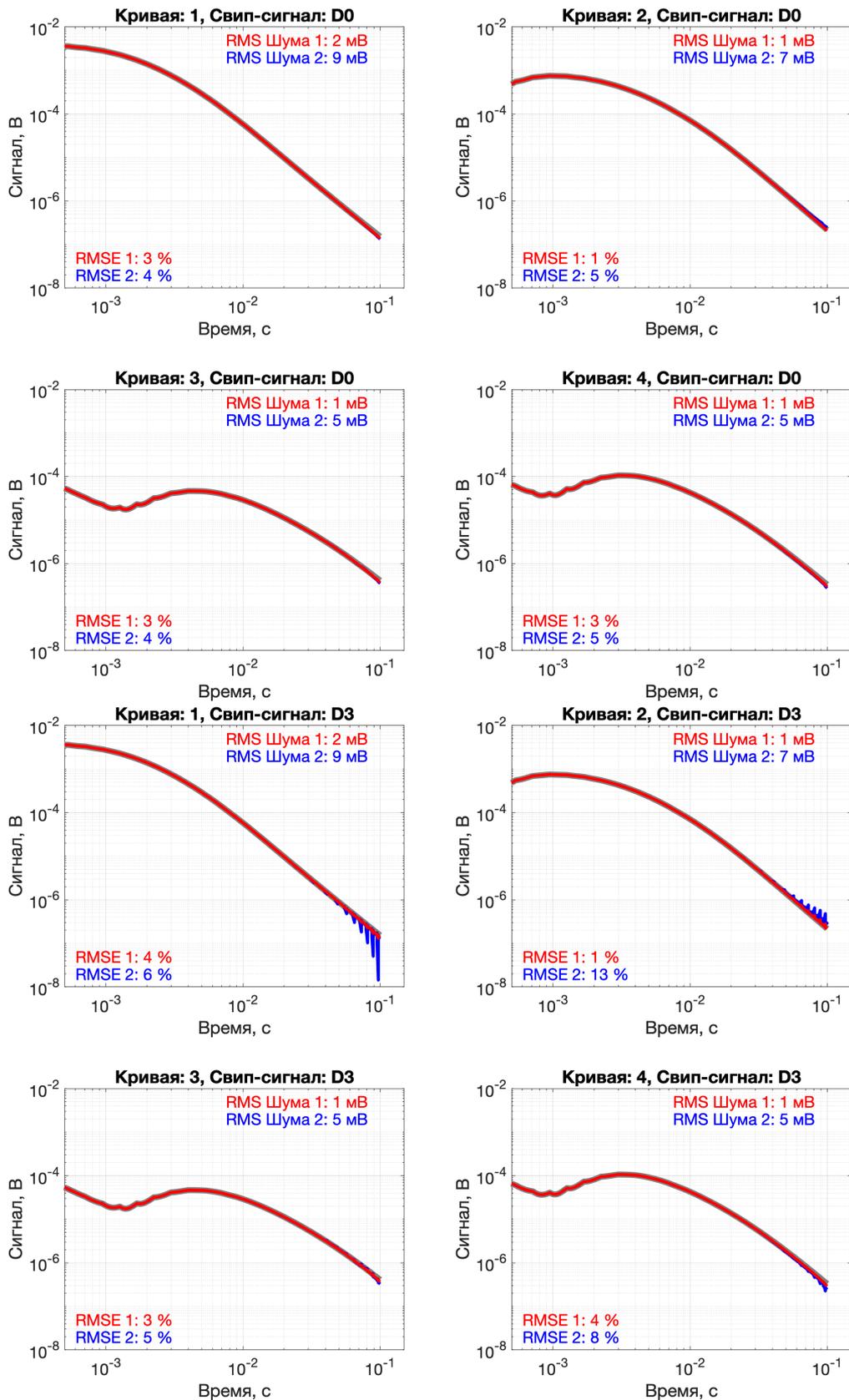


Рисунок 3.28 – Примеры восстановленных кривых отклика для четырёх пунктов зондирования, полученных в результате деконволюции зашумленных данных с использованием свип-сигналов D0 (а-г) и D3 (д-з): а, д — пункт 1; б, е — пункт 2; в, ж — пункт 3; г, з — пункт 4. Обозначения: 1 — истинные кривые; 2 — результат при умеренном уровне зашумления (RMS = 1–2 мВ); 3 — при высоком уровне шума (RMS = 7–9 мВ).

Результаты моделирования режима накопления, реализованного посредством разнополярного меандра с паузой, представлены в виде серии кривых становления поля (рис. 3.29) и демонстрируют выраженные искажения на поздних временных интервалах. Амплитуда и выраженность этих искажений значительно превосходят аналогичные характеристики, наблюдаемые при использовании свип-сигналов на основе ПСКП из групп С и D в режиме ШПС [Алексеев и др., 2024].

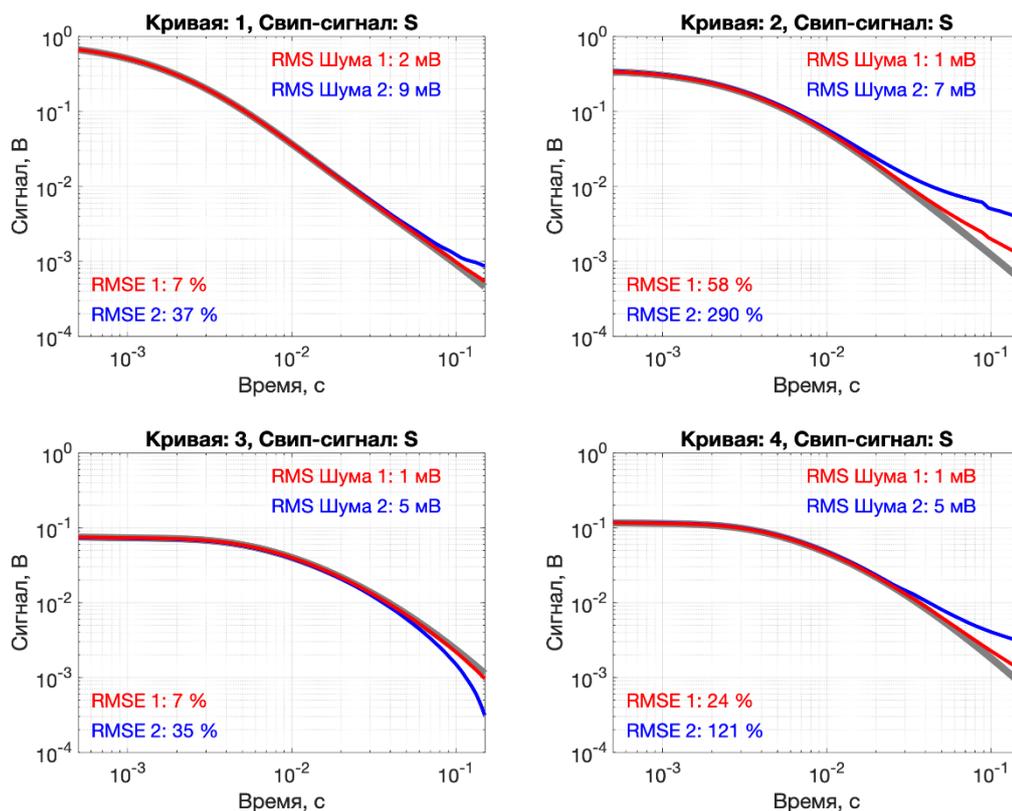


Рисунок 3.29 – Примеры кривых становления поля для четырёх пунктов зондирования, полученных в результате накопления зашумленных данных с использованием свип-сигнала в форме разнополярного меандра с паузой (сигнал S): а — пункт 1; б — пункт 2; в — пункт 3; г — пункт 4. Обозначения: 1 — истинные кривые спада, соответствующие длинному импульсу (500 мс); 2 — восстановленные кривые при умеренном уровне зашумления (двукратный RMS); 3 — при высоком уровне зашумления (десятикратный RMS). Также приведены значения среднеквадратичных отклонений (RMS) шумов во входных данных и RMSE для кривых 2 и 3, аналогично рис. 6–8.

Сводные оценки среднеквадратичных погрешностей (RMSE) для всех рассмотренных конфигураций свип-сигналов источника представлены в таблице (3.2).

Свип-сигнал	Кривая для пункта 1		Кривая для пункта 2		Кривая для пункта 3		Кривая для пункта 4	
	RMSE 1, %	RMSE 2, %						
A0	24	71	23	68	6	22	8	12
A1	124	623	17	76	18	91	22	109
A2	33	125	32	119	4	50	7	43
A3	33	118	34	123	4	53	6	34
A4	36	129	34	124	4	54	6	32
T1A1	179	885	22	85	25	137	33	142
T2A1	123	619	13	65	18	90	21	106
B0	10	9	9	6	9	6	7	13
B1	15	67	184	928	30	157	25	132
B2	45	394	873	4247	165	678	136	523
B3	36	286	620	3016	121	508	101	404
B4	40	331	731	3546	142	589	116	460
B5	15	58	169	863	26	145	21	120
C0	3	6	3	3	2	1	2	2
C1	4	10	3	5	2	4	2	3
C2	2	4	3	5	2	4	2	3
C3	4	9	3	5	2	4	2	2
C4	4	9	3	4	2	4	2	2
C5	4	10	3	5	2	4	2	3
C6	6	34	4	23	2	6	3	15
LC1	11	52	11	53	2	6	6	30
D0	3	4	1	5	3	4	3	5
D1	4	7	1	14	3	5	4	9
D2	4	7	1	14	3	5	4	9
D3	4	6	1	13	3	5	4	8
D4	3	6	1	13	3	5	4	8
D5	3	6	1	13	3	6	4	9
D6	10	58	11	47	6	15	4	16
D7	47	253	45	202	17	58	13	68
S	7	37	58	290	7	35	24	121

Таблица 3.2 – Значения среднеквадратичных погрешностей (RMSE) кривых после деконволюции при различном уровне зашумления полезного сигнала в режимах ШПС и накопления.

Анализ значений среднеквадратичных погрешностей (RMSE), полученных для различных вариантов свип-сигналов источника, позволяет сформулировать ряд обобщающих выводов, подтверждающих предварительные предположения, основанные на анализе спектральных характеристик сигналов:

1. Внутри каждой группы сигналов (A–D) наилучшие результаты демонстрируют базовые псевдослучайные кодовые последовательности (ПСКП) — A0, B0, C0 и D0. Использование модулированных квазигармонических сигналов, несмотря на формальное расширение спектра, приводит к существенному увеличению ошибок реконструкции, что

обусловлено снижением амплитуды основного спектрального лепестка. При этом чёткой зависимости погрешности от частоты несущей не выявлено.

2. Свип-сигналы с треугольными и пилообразными импульсами, а также сигналы с непрерывным изменением частоты (LC1), показали худшие результаты, вероятно вследствие усложнённой временной структуры и, как следствие, менее эффективной фильтрации паразитных отскоков при деконволюции.
3. Свип-сигналы, основанные на ПСКП с большей длительностью кодового элемента, обеспечивают более высокое качество восстановления откликов. Это напрямую связано с более высоким уровнем энергетического насыщения их амплитудных спектров в рабочем диапазоне частот.
4. Сравнение с традиционным режимом накопления (модифицированный меандр S) показывает, что его эффективность находится между результатами, достигнутыми с ПСКП с короткими (A, B) и длинными (C, D) кодовыми элементами. Последние обеспечивают более чем двукратное снижение погрешности даже при условии увеличенного числа накоплений в режиме меандра, которое в реальных условиях ограничено.

Таким образом, представленные результаты уточняют и дополняют ранее полученные данные [Кошурников и др., 2024], где отмечалось ухудшение качества откликов при увеличении длительности кодового элемента. В текущем исследовании, благодаря использованию процедуры фильтрации паразитных компонент, наилучший результат продемонстрировали именно ПСКП с длительным элементом.

Дополнительно, наблюдаемое снижение эффективности помехоподавления для высокочастотных квазигармонических и треугольных свип-сигналов относительно исходных ПСКП указывает на ограниченность их применения в условиях сильных шумов, что требует дополнительного изучения.

Проведённый комплексный анализ эффективности различных свип-сигналов источника, основанный на численном моделировании электромагнитных откликов

для типичных геоэлектрических условий арктического шельфа, позволяет сделать следующие обобщённые заключения:

Использование свип-сигналов, сформированных на базе ПСКП, в сочетании с процедурами деконволюции и специализированной фильтрации, обеспечивает существенное повышение устойчивости к шумовым искажениям по сравнению с традиционными методами накопления. Наиболее эффективными в этом контексте являются сигналы с длительными кодовыми элементами, обладающие более выраженной энергетической насыщенностью в целевом частотном диапазоне.

Представленные результаты подтверждают перспективность применения ПСКП в системах импульсной электроразведки, несмотря на существующие технические ограничения, связанные с реализацией ШПС-режима в полевых условиях. Будущие исследования должны быть ориентированы на разработку оптимальных свип-сигналов с заданными спектральными характеристиками, а также на расширение методов частотного анализа, включая использование дисперсионных соотношений и усовершенствованных алгоритмов обработки данных.

На заключительном этапе анализа с целью оценки погрешностей результирующих геоэлектрических моделей и общей эффективности различных режимов работы и конфигураций измерительной установки была выполнена инверсия кривых ПХ/ИПХ, восстановленных по зашумленным временным рядам в режимах накопления и ШПС. В качестве примера приводятся результаты для двух типичных точек зондирования, существенно отличающихся параметрами геоэлектрического разреза (рис. 3.30 -3.31).

Эксперименты по инверсии зашумленных синтетических откликов выполнялась с использованием программного обеспечения [Krylov et al., 2023]. Методика инверсии предполагала автоматический подбор параметров 4-слойной модели с фиксацией удельного сопротивления и мощности верхнего слоя, что на практике обеспечивается точным знанием батиметрии и УЭС поверхностного слоя воды, измеряемых независимыми средствами.

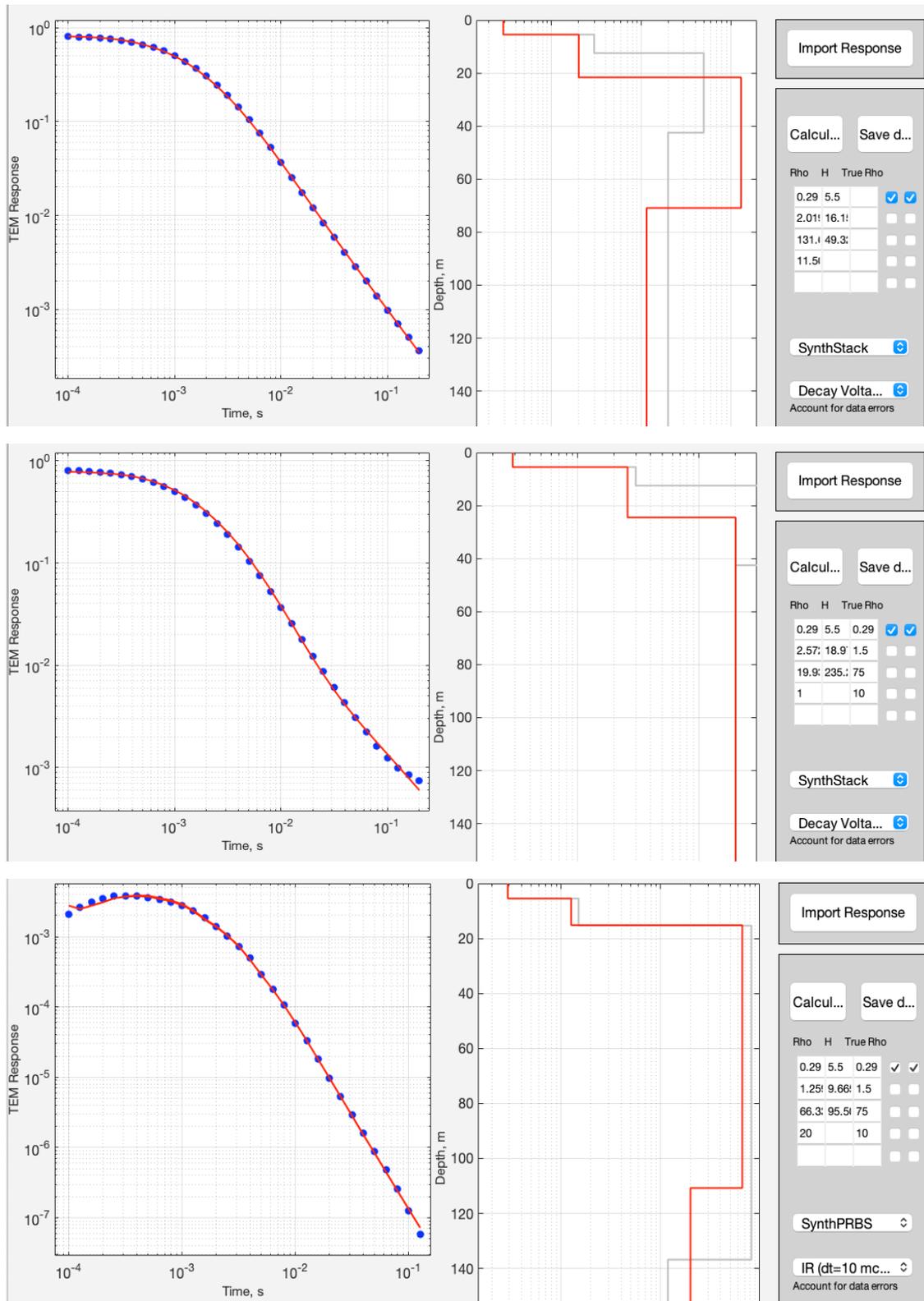


Рисунок 3.30 – Результаты инверсии (точка зондирования №1): кривой в режиме накопления без шума (верхняя панель); кривой в режиме накопления с уровнем шума  $\times 10$  (средняя панель); кривой в режиме ШПС (свип-сигнал C0) с уровнем шума  $\times 10$  (нижняя панель).

	Сопротивление слоев (Rho)	Мощность слоя (H, м)
Истинная модель для точки 1:	0.29	5.5
	1.5	6.8
	75	100
	10	$\infty$
Модель начального приближения для точки 1:	0.29 (F)	5.5(F)
	3	7
	50	30
	20	$\infty$
Результаты инверсии (накопление, без шума):	0.29 (F)	5.5(F)
	2	16
	131	49
	11	$\infty$
Результаты инверсии (накопление, шум x 10):	0.29 (F)	5.5(F)
	2.6	19
	20	235
	1	$\infty$

Таблица 3.3 – Исходные и выходные данные: Эксперименты по инверсии зашумлённых синтетических откликов для точки 1. Символ F обозначает фиксирование (закрепление) соответствующего параметра в процессе инверсии.

Результаты инверсии (ШПС С0, шум x 10): Эксперименты по инверсии зашумлённых синтетических откликов выполнялась с использованием программного обеспечения, разработанного Д. Алексеевым с соавторами [Krylov et al., 2023]. Методика инверсии предполагала автоматический подбор параметров 4-слойной модели с фиксацией удельного сопротивления и мощности верхнего слоя, что на практике обеспечивается точным знанием батиметрии и УЭС поверхностного слоя воды, измеряемых независимыми средствами.

	Сопротивление слоев (Rho)	Мощность слоя (H, м)
Истинная модель для точки 1:	0.28	15.5
	4.3	19
	34	61
	10	$\infty$
Модель начального приближения для точки 2:	0.28 (F)	15.5(F)
	10	50
	10	50
	10	$\infty$
Результаты инверсии (накопление, без шума):	0.28 (F)	15.5(F)
	9.5	5
	10	4.3
	1	$\infty$
Результаты инверсии (накопление, шум x 10):	0.29 (F)	15.5(F)
	4.57	19,5
	29	36
	20	$\infty$

Таблица 3.4 – Исходные и выходные данные: Эксперименты по инверсии зашумлённых синтетических откликов для точки 2. Символ F обозначает фиксирование (закрепление) соответствующего параметра в процессе инверсии.

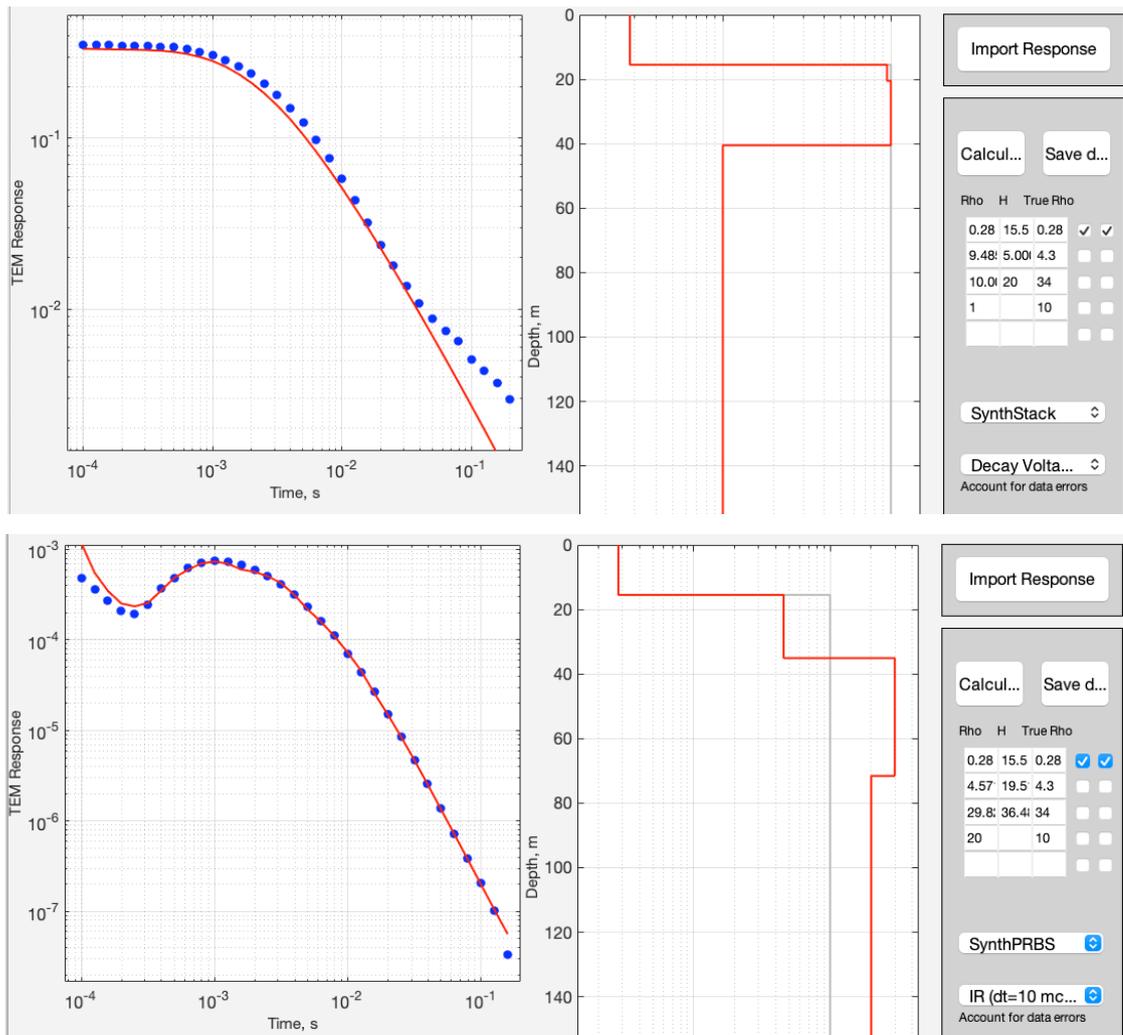


Рисунок 3.31 – Результаты инверсии (точка зондирования №2): кривой в режиме накопления с уровнем шума  $\times 10$  (верхняя панель); кривой в режиме ШПС (свип-сигнал C0) с уровнем шума  $\times 10$  (нижняя панель).

В обоих приведенных в качестве примера случаях (таб. 3.3-3.4) наблюдается лучшая сходимость решения (близость к истинной модели) при инверсии отклика, восстановленного по ШПС-данным, в гораздо меньшей степени искаженного на поздних временах влиянием низкочастотного шума.

### §3.5 Основные выводы

Проведённое исследование было направлено на повышение эффективности метода зондирования становления поля (ЗСБ) в условиях повышенного шумового фона, типичного для морских арктических районов. Основное внимание было уделено оценке возможности использования псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСКП) в качестве управляющих сигналов для импульсной электроразведки.

Анализ экспериментальных записей позволил установить основные характеристики помехи, искажающей сигналы ЗСБ при использовании буксируемой диполь-дипольной установки конкретной конфигурации: частотный диапазон шума ниже 10 Гц и средний уровень амплитуд квазипостоянной составляющей около 2-3 мВ. Наблюдаемые искажения кривых становления поля на поздних временах (свыше 70-80 мс) существенно ограничивает возможность их использования для последующей интерпретации. Стандартные методы шумоподавления, основанные на накоплении и усреднении, показали свою недостаточность.

Для оценки теоретических возможностей преодоления этих ограничений были имитированы сигналы на основе ПСКП, обладающих благоприятными автокорреляционными и спектральными свойствами.

В рамках проведенного численного эксперимента с 65-секундными временными рядами установлено, что переход от режима накопления с относительно небольшим количеством длинных импульсов к режиму ШПС с существенно большим количеством коротких импульсов позволяет существенно расширить (с 10-50 до 80-110 мс, в зависимости от типа накопления и ШПС) неискаженный шумами диапазон измеряемой переходной характеристики, а значит – увеличить глубинность исследований.

Анализ более коротких (8 с) рядов, в большей степени соответствующих реальной скорости съемки с буксируемой системой, выполненный на основе откликов для квазидвумерной геоэлектрической модели шельфа моря Лаптевых, показал, что и в этом случае режим ШПС обеспечивает стабильное восстановление

откликов даже при высоком уровне шума — особенно при использовании бинарных ПСКП с длительными кодовыми элементами. Именно эти сигналы продемонстрировали минимальные значения среднеквадратичной ошибки (RMSE), благодаря высокой энергетической плотности в рабочем частотном диапазоне.

Попытки улучшить характеристики сигнала за счёт модуляции (гармонической, треугольной, пилообразной) не дали ожидаемого результата. Модулированные сигналы уступают базовым ПСКП по устойчивости, что связано с падением амплитуды основного спектрального лепестка и возникновением паразитных осцилляций. Для борьбы с этим эффектом была использована простая фильтрационная процедура, позволившая существенно повысить качество деконволюции.

Сравнение с традиционным режимом накопления (разнополярный меандр) подтвердило преимущество ПСКП: даже при многократном усреднении режим накопления уступал по точности сигналам на основе ПСКП, особенно в условиях зашумлённости.

Полученные оценки в терминах снижения погрешностей кривых становления поля также подтверждаются повышением точности реконструкции геоэлектрической модели при решении 1D-обратной задачи.

В целом, полученные результаты указывают на высокую перспективность ПСКП в составе систем морской импульсной электроразведки и подчёркивают важность дальнейшей оптимизации параметров управляющих сигналов. Развитие этого направления открывает путь к более надёжному и точному зондированию в сложных природных условиях.

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ (ШУМОПОДОБНЫХ) СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ВИБРАЦИОННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

В настоящей главе рассматривается возможность повышения разрешающей способности сейсморазведки за счёт использования широкополосных псевдослучайных свип-сигналов путем анализа качества восстановления сейсмических трасс и сейсмограмм по набору синтетических виброграмм, смоделированных для псевдослучайных (ШПС) и частотно-модулированных (ЧМ) квазигармонических свип-сигналов в рамках 1D и 2D подходов. С помощью корреляционной обработки, а также деконволюции зашумленных синтетических виброграмм и их сопоставления с сейсмограммами в режиме одиночного импульса, продемонстрированы преимущества применения ШПС для получения детальных сейсмических изображений с выделением основных отражающих границ.

### §4.1 Моделирование синтетических импульсных переходных характеристик (1D)

Для моделирования синтетических виброграмм использовалась синтетическая импульсная переходная характеристика (ИПХ) для горизонтально-слоистой модели среды, упрощенно рассчитанная без учета углов падения волны на границы в форме суперпозиции набора дельта-импульсов, соответствующих временам пробега сейсмической волны от источника до отражающих границ и обратно к приёмнику [Алексеев и др., 2023]. Времена пробега рассчитываются на основе годографа для горизонтально-слоистой модели среды:

$$t(x) = \sqrt{t_{0n}^2 + \frac{x^2}{v_{эф}^2}} = \frac{1}{v_{эф}} \sqrt{x^2 + 4 * H_{эф}^2} \quad (4.1)$$

где

- $t_{0n}$  — время пробега при вертикальном падении луча (без учёта горизонтального разнесения);

- $v_{эф}$  — эффективная скорость, зависящая от всех слоёв до  $n$ -й границы;
- $H_{эф}$  — суммарная мощность (глубина) до  $n$ -й границы;
- $x$  — горизонтальный разнос между источником и приёмником.

Величина  $t_{0n}$  определяется как:

$$t_{0n} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_i} \quad (4.2)$$

где  $v_i$  - скорость сейсмической волны в  $i$  слое;  $a$  и  $h_i$  мощность соответствующего  $i$  слоя;

Каждый дельта-импульс соответствует значению акустического импеданса слоя, скорректированного с учётом затухания сигнала при прохождении через вышележащие слои. Коэффициенты отражения на границе двух соседних слоёв рассчитывались как:

$$A_i = \frac{AI_i - AI_{i+1}}{AI_i + AI_{i+1}} \quad (4.3)$$

где

- $AI_i = V_i * \rho_i$  — акустический импеданс  $i$ -го слоя;
- $AI_{i+1}$  — акустический импеданс  $(i+1)$ -го слоя;

Амплитуда отражения  $P_i$  с учётом затухания рассчитывалась по формуле:

$$P_i = A_i * \prod_{k=1}^{i-1} (1 - A(k)) * (1 + A(k)) \quad (4.4)$$

где произведение  $(1 - A(k)) * (1 + A(k))$  учитывает затухание сигнала при прохождении через каждую вышележащую границу  $k$ .

В качестве эталонной геологической структуры была выбрана горизонтально-слоистая модель, состоящая из восьми слоев (табл. 4.1). С помощью

приведенных выше выражений была построена импульсная переходная характеристика среды (рис. 4.1).

Слой	Мощность, м	Скорость, м/с	Плотность кг/м <sup>3</sup>
1	980	1000	1200
2	560	2000	1400
3	500	1000	1200
4	390	2000	1400
5	650	4000	2000
6	540	1000	1200
7	420	5000	2600
8	960	1000	1200

Таблица 4.1 – Параметры горизонтально-слоистой скоростной модели, используемой для расчета импульсной переходной характеристики (коэффициентов отражения по разрезу).

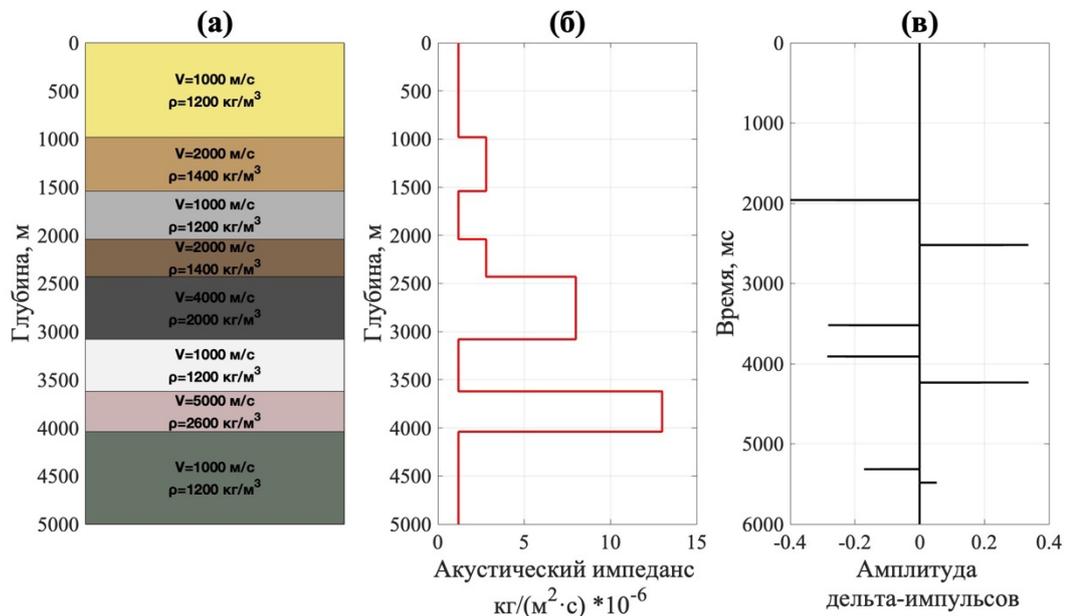


Рисунок 4.1 – Синтетические данные, применяемые для дальнейшего моделирования сейсмограмм и восстановления импульсной переходной характеристики при различных режимах вибрационного зондирования среды: (а) – синтетическая многослойная геологическая модель; (б) профиль акустической жесткости для модели горизонтально-слоистой среды; (в) смоделированная импульсная переходная характеристика системы "среда-установка" при расстоянии между источником и приёмником 0 м.

#### §4.2 Анализ помехоподавления в рамках 1D моделирования вибросейсмических данных при зашумлении синтетическим Гауссовским шумом

С использованием построенных синтетических ИПХ в рамках исследования применения псевдослучайных управляющих сигналов было выполнено моделирование синтетических виброграмм.

При расчете виброграмм, как и ранее, использовалось сверточное соотношение

$$s(t) = m(t) * h(t). \quad (4.5)$$

Для расчета  $s(t)$  было сгенерировано несколько последовательностей  $m(t)$ , представленных следующими вариантами (рис 4.2):

- Двоичная последовательность, содержащая  $2^{13}$  импульсов по 3 мс каждый, сформированная без применения сглаживания; суммарное время воздействия составляет приблизительно 25 секунд.
- Двоичная последовательность длиной  $2^{11}$  импульсов с длительностью одного импульса 12 мс, также без использования сглаживания; общая продолжительность порядка 25 секунд.
- Последовательность из  $2^9$  двоичных импульсов продолжительностью по 48 мс, сформированная без сглаживания; полная длительность составляет около 25 секунд.
- Частотно-модулированный (ЧМ) сигнал управления с экспоненциальным изменением частоты от 10 до 300 Гц и общей длительностью 25 секунд.

Поскольку при вибрационном зондировании, в отличие от электромагнитного, в реальных условиях невозможно добиться реализации идеально прямоугольных импульсов, все прямоугольные импульсы были сглажены с использованием оконного фильтра Хэмминга. Этот метод позволяет

минимизировать высокочастотные гармоники и делает сигнал более реалистичным для последующего моделирования.

Функция Хэмминга применяется для сглаживания амплитудного профиля импульсов, обеспечивая плавное нарастание и спад в начале и конце импульса.

Математически окно Хэмминга определяется выражением:

$$\omega(n) = 0.54 - 0.46 * \cos\left(\frac{2\pi n}{N - 1}\right), n = 0, 1 \dots, N - 1 \quad (4.6)$$

где:  $\omega(n)$  — значение окна Хэмминга на  $n$ -й точке,  $N$  — количество точек, соответствующее длительности импульса.

Для каждого импульса с длительностью  $T$  и частотой дискретизации  $f_s$ , окно Хэмминга рассчитывается для  $N = T * f_s$ , амплитуда прямоугольного импульса  $S(n)$  модифицируется умножением на окно:

$$S_{\omega}(n) = S(n) * \omega(n) \quad (4.7)$$

где:  $S_{\omega}(n)$  — сглаженный импульс,  $S(n)$  — исходный прямоугольный импульс.

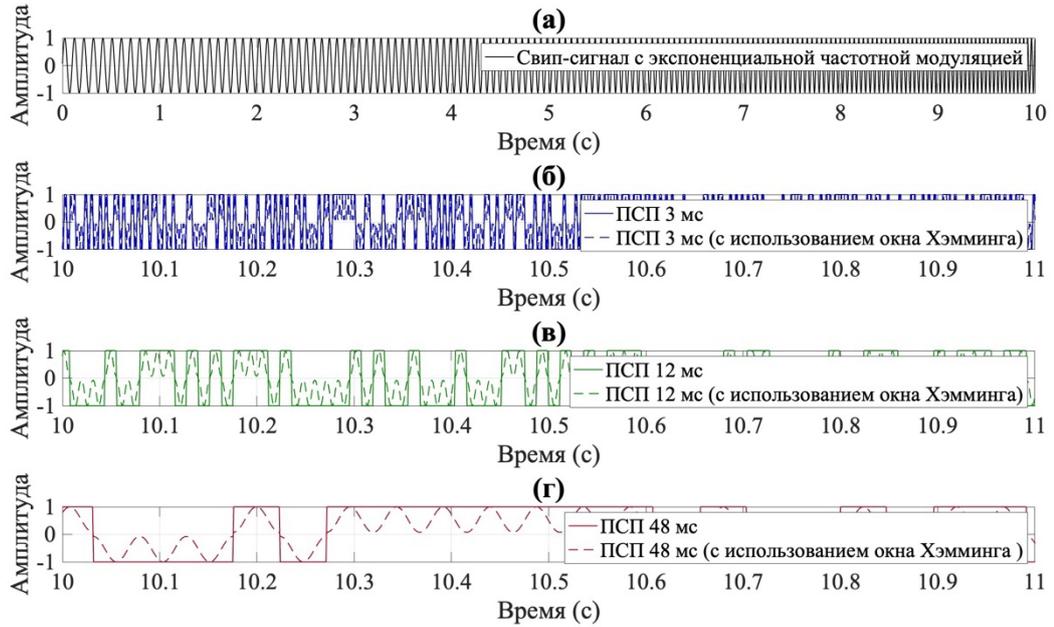


Рисунок 4.2 – Фрагменты сигналов, применяемых для моделирования процессов вибрационного зондирования и их модификации с использованием оконного сглаживания: (а) – фрагмент свип-сигнал с экспоненциальной частотной модуляцией в диапазоне от 10 до 100 Гц; (б) – фрагмент псевдослучайной последовательности (ПСП) с длиной импульса 3 мс, до и после сглаживания с использованием окна Хэмминга; (в) –фрагмент ПСП с длиной импульса 24 мс, до и после сглаживания с использованием окна Хэмминга; (г) – фрагмент ПСП с длиной импульса 48 мс, до и после сглаживания с использованием окна Хэмминга.

Для оценки помехозащищённости в каждом из перечисленных режимов (псевдослучайные последовательности с длиной импульса 3 мс, 12 мс, 48 мс после сглаживания с использованием окна Хэмминга, а также ЧМ- свип), принятый сигнал  $s(t)$  был искусственно зашумлён синтетическим гауссовым шумом  $n(t)$  при уровне отношения сигнал/шум (SNR), составляющем -2 дБ (рис. 4.3):

$$s_n(t) = s(t) + n(t) = m(t) * \tilde{h}(t). \quad (4.8)$$

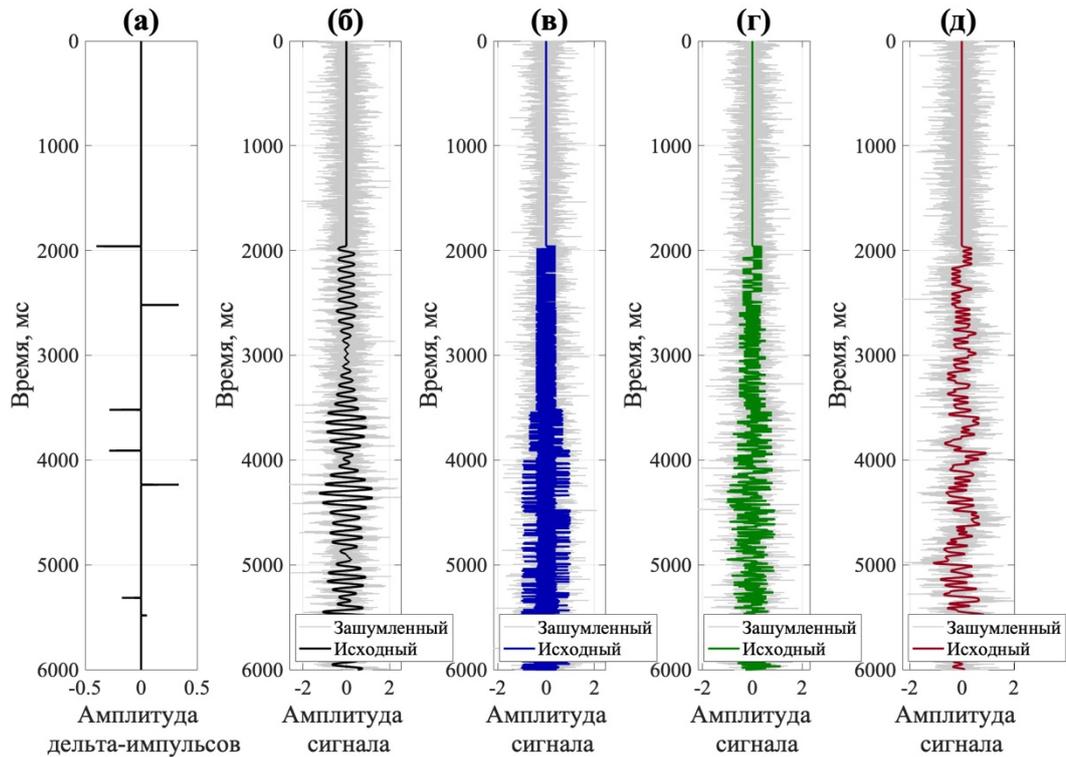


Рисунок 4.3 – Фрагменты сигналов, полученных при моделировании вибрационного зондирования с использованием управляющих сигналов различной формы: (а) – Импульсная переходная характеристика системы «среда–установка» при нулевом расстоянии между источником и приёмником ( $x = 0$  м); (б) – Сигнал, синтезированный с использованием свип-сигнала с экспоненциальной частотной модуляцией в диапазоне 10–100 Гц: чёрная кривая — без шумов; серая — с добавлением синтетического шума при уровне SNR = -2 дБ; (в) – Сигнал, полученный с применением сглаженной псевдослучайной последовательности (ПСП) с длиной импульса 3 мс (окно Хэмминга): синяя кривая — без шумов; бледно-синяя — с шумом (SNR = -2 дБ); (г) – Аналогичный сигнал для ПСП с длиной импульса 12 мс: зелёная кривая — без шумов; бледно-зелёная — с шумом; (д) – Сигнал, синтезированный с использованием ПСП с длиной импульса 48 мс: красная кривая — без шумов; бледно-красная — с шумом (SNR = -2 дБ).

В результате вычисления взаимной корреляционной функции между управляющим сигналом и синтезированными виброграммами были построены коррелограммы (рис. 4.4). Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы: использование экспоненциально модулированного свип - сигнала с диапазоном частот от 10 до 100 Гц в качестве управляющего не обеспечивает эффективного подавления фоновых осцилляций. Уровень корреляционного шума при применении ЧМ-свип -сигнала заметно выше по сравнению с псевдослучайными последовательностями с импульсами длительностью 3 и 12 мс [Алексеев и др., 2023].

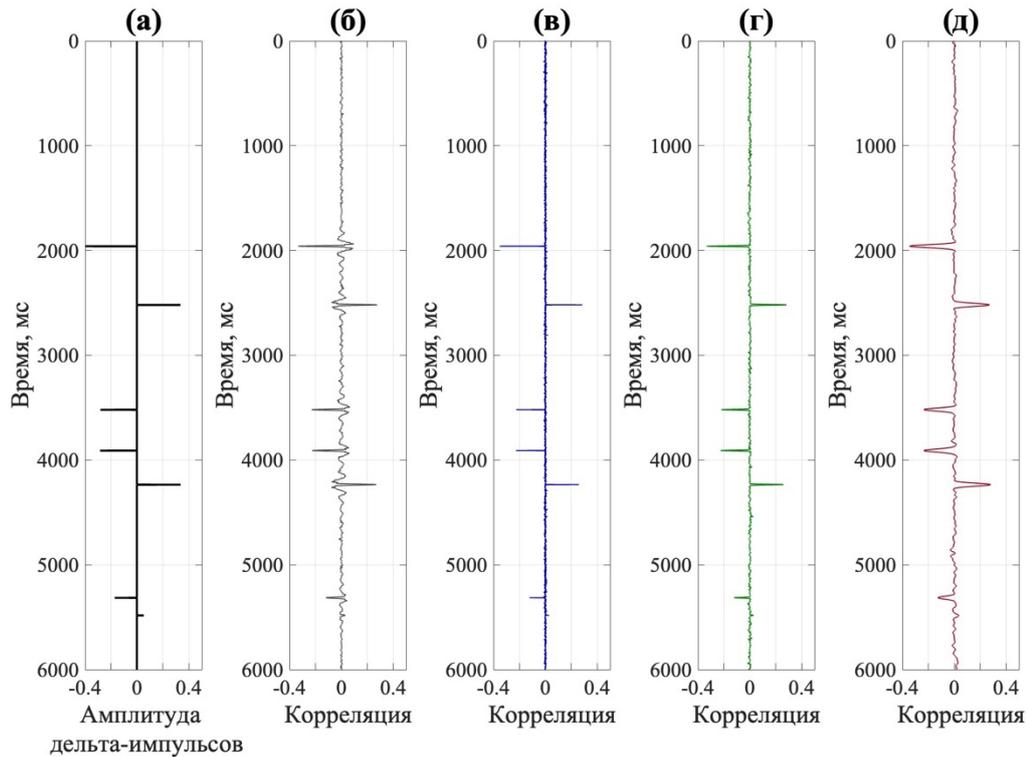


Рисунок 4.4 – Сейсмограммы, полученные в результате корреляционной обработки виброграмм. (а) – смоделированная импульсная переходная характеристика системы «среда–установка» при расстоянии между источником и приёмником, равном 0 м (чёрная кривая); (б) – результат взаимной корреляции (ВКФ) между свип-сигналом с экспоненциальной частотной модуляцией в диапазоне от 10 до 100 Гц и записанным откликом среды (серая кривая); (в) – результат ВКФ между управляющим сигналом в виде псевдослучайной последовательности (ПСП) с длиной импульса 3 мс, сглаженной окном Хэмминга, и соответствующим откликом среды (тёмно-синяя кривая); (г) – аналогичный результат для ПСП с длиной импульса 12 мс (тёмно-зелёная кривая); (д) – результат для ПСП с длиной импульса 48 мс (тёмно-красная кривая).

С другой стороны, применение управляющего сигнала в виде псевдослучайной последовательности (ПСП) с длиной импульса 3 или 12 мс, сглаженной с использованием окна Хэмминга, позволяет чётко выделить последнюю отражающую границу даже при наличии значительного шумового фона. Однако использование ПСП с длиной импульса 48 мс, несмотря на сглаживание, как и в случае с экспоненциально модулированным свип-сигналом, не позволяет уверенно локализовать нижнюю границу разреза.

Таким образом, при использовании метода взаимной корреляции предпочтение следует отдавать управляющим сигналам на основе псевдослучайных последовательностей. При этом необходимо учитывать, что увеличение длительности элементарного импульса приводит к снижению эффективности подавления шумов.

Второй способ оценки ИПХ основан на решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) методом наименьших квадратов (МНК). Однако его применение в контексте вибрационного зондирования отличается от предыдущего случая, описанного в первой главе, поскольку спектр полезного сигнала в данном случае значительно шире, чем при зондировании в ближней зоне.

Частотные спектры рассматриваемых управляющих сигналов, а также спектры результатов деконволюции приведены на рисунках 4.5 и 4.6.

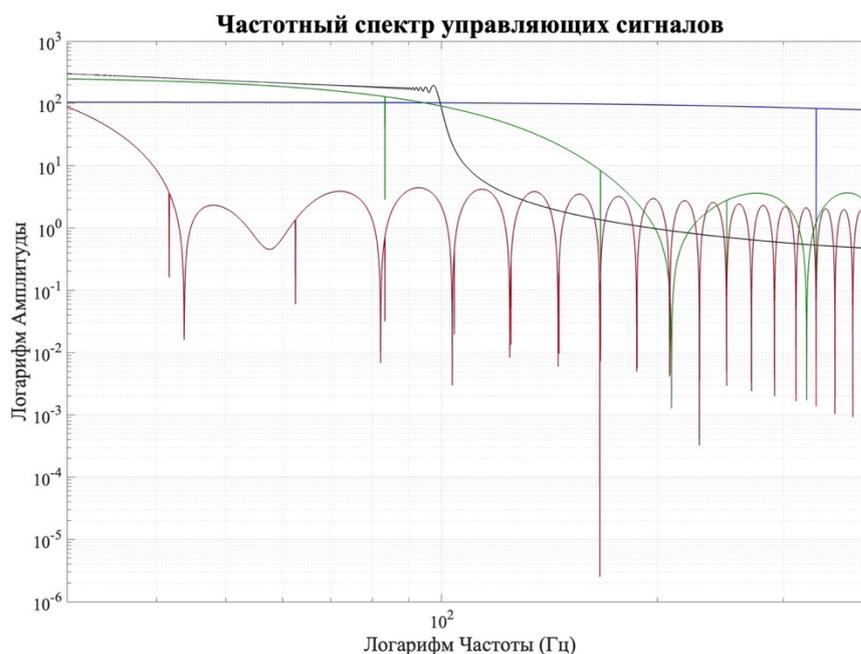


Рисунок 4.5 — амплитудно-частотные спектры различных управляющих сигналов, используемых при моделировании вибрационного зондирования. Черная кривая — спектр ЧМ-сви́па с экспоненциальной частотной модуляцией в диапазоне 10–130 Гц; темно-синяя кривая — спектр псевдослучайной последовательности (ПСП) с длительностью импульса 3 мс, сглаженной окном Хэмминга; темно-зеленая кривая — спектр ПСП с длиной импульса 12 мс; темно-красная кривая — спектр ПСП с длиной импульса 48 мс. Ширина и форма спектров позволяют оценить потенциал сигналов по глубине зондирования и разрешающей способности. ПСП-сигналы демонстрируют более широкий и равномерно распределённый спектр по сравнению с ЧМ-сви́пом, что указывает на их пригодность для глубоких и зашумлённых условий.

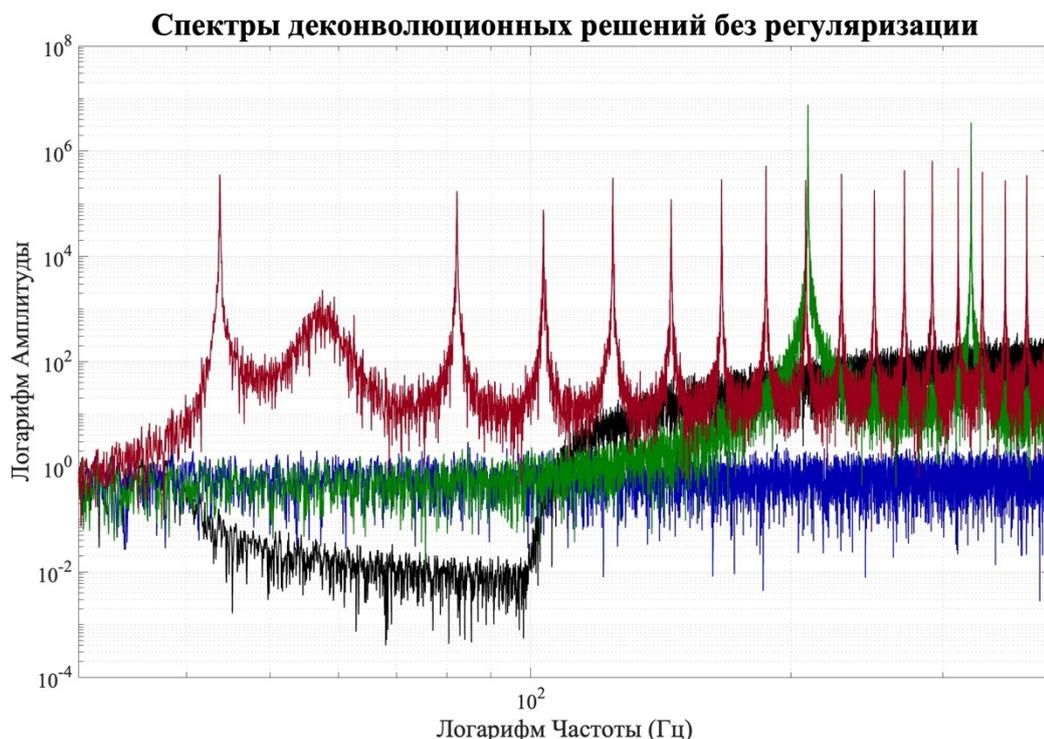


Рисунок 4.6 – амплитудно-частотные спектры переходных характеристик, восстановленных методом деконволюции без регуляризации. Черная кривая соответствует результату для ЧМ-свипа; тёмно-синяя кривая — для ПСП 3 мс; тёмно-зелёная — для ПСП 12 мс; тёмно-красная — для ПСП 48 мс. Хорошо заметно, что деконволюция, основанная на ПСП, позволяет получить более широкополосный спектр по сравнению с традиционным ЧМ-свипом. Это говорит о повышенной способности таких сигналов восстанавливать временные характеристики среды без искажений.

Как и следовало ожидать, в диапазонах частот, где амплитудный спектр управляющего сигнала стремится к нулю, в результатах деконволюции наблюдаются выраженные искажения. Такие частотные минимумы обуславливают значительное усиление шумов и проявление искажений, что, в свою очередь, приводит к потере устойчивости решения при деконволюции. В результате это существенно затрудняет интерпретацию полученных данных и снижает достоверность выделения геологических границ.

После применения регуляризации с подбором оптимального значения параметра регуляризации  $\lambda$  ( $\lambda=10^4$ ) были получены решения, характеризующиеся гораздо более высоким качеством (рис. 4.7). Спектральные характеристики данных решений показаны на рисунке 4.8.

Результаты деконволюционной обработки с применением регуляризации Тихонова, представленные на рисунке 4.7, демонстрируют, что данный метод позволяет успешно восстановить все основные отражающие границы

моделируемой многослойной среды при различных типах модуляции управляющих сигналов. Тем не менее, в условиях одномерного моделирования значительных преимуществ по сравнению с методом взаимной корреляционной функции (ВКФ) выявлено не было. Более того, метод ВКФ обладает существенно меньшей вычислительной сложностью, поскольку не требует решения системы линейных алгебраических уравнений. Это делает его более предпочтительным в вычислительно ограниченных сценариях, где важны скорость обработки и эффективность использования ресурсов.

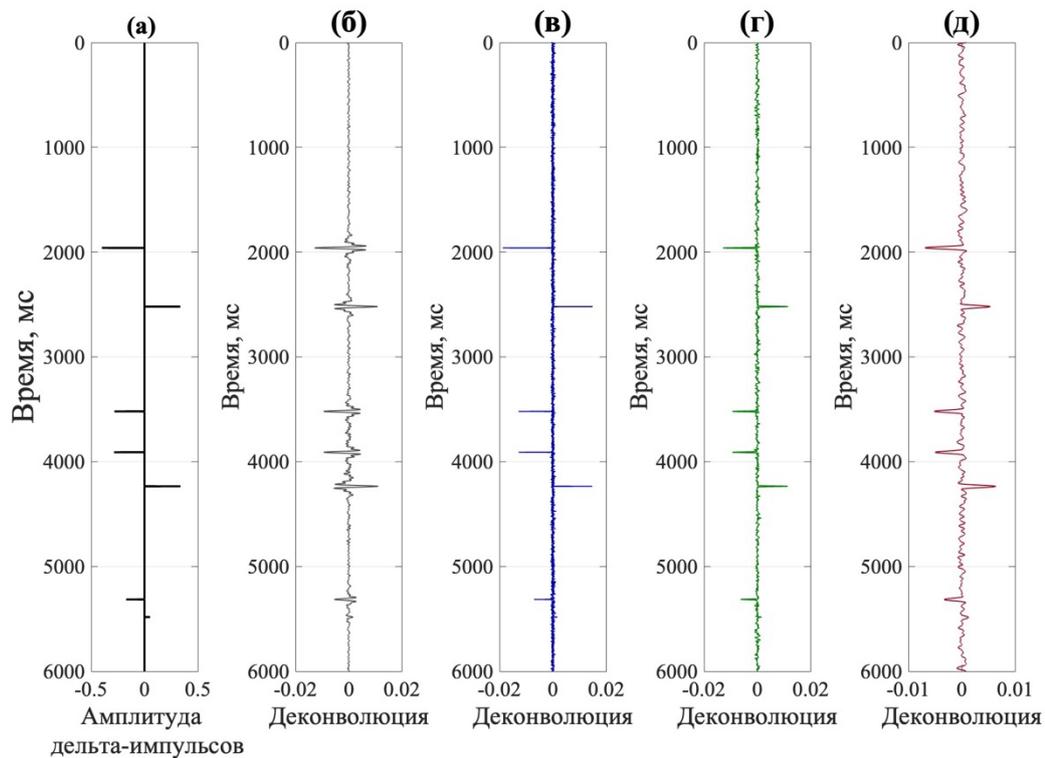


Рисунок 4.7 – Сеймотрассы, полученные методом деконволюции с использованием регуляризации Тихонова. Графики отображают результаты обработки сигналов вибрационного зондирования с применением различных типов управляющих сигналов: (а) – смоделированная импульсная переходная характеристика системы «среда–установка» при расстоянии между источником и приёмником 0 м (чёрная кривая); (б) – результат деконволюции для управляющего свип-сигнала с экспоненциальной частотной модуляцией в диапазоне 10–100 Гц (серая кривая); (в) – результат деконволюции для псевдослучайной последовательности (ПСП) с длиной импульса 3 мс, сглаженной с использованием окна Хэмминга (тёмно-синяя кривая); (г) – аналогичный результат для ПСП с длиной 12 мс (тёмно-зелёная кривая); (д) – результат для ПСП с длиной 48 мс (тёмно-красная кривая).

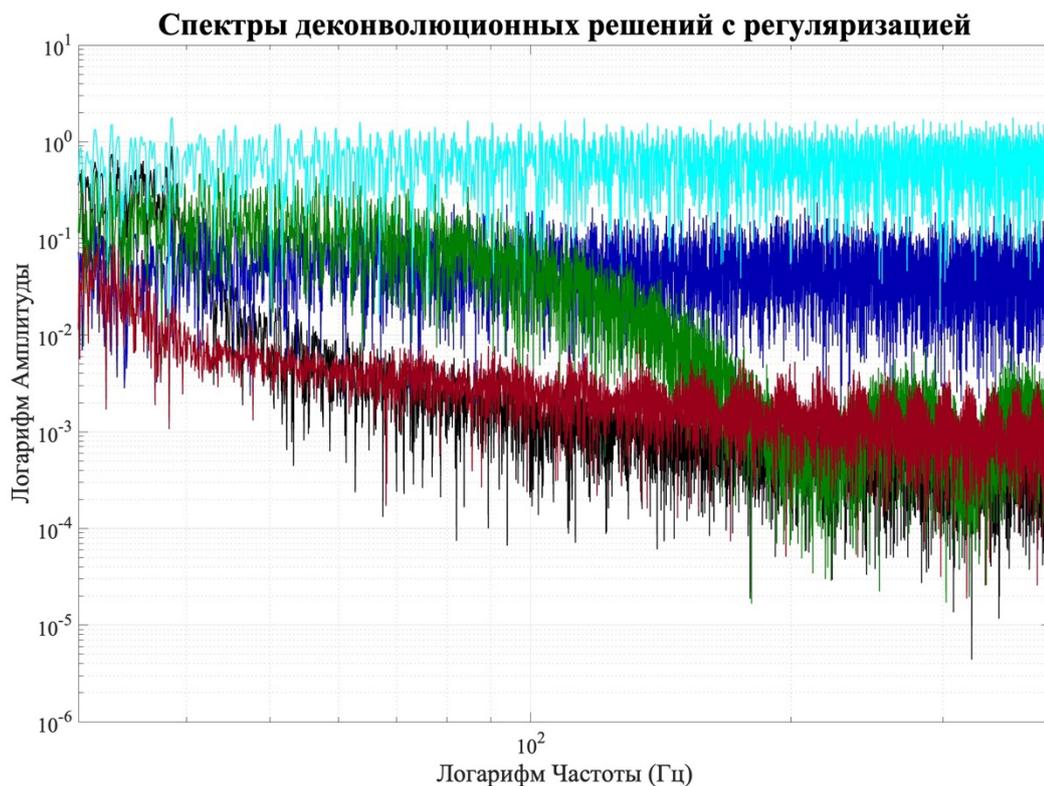


Рисунок 4.8 – амплитудно-частотные спектры переходных характеристик, восстановленных методом деконволюции с применением регуляризации. Черная кривая — результат для ЧМ-свипа; тёмно-синяя — для ПСП 3 мс; тёмно-зелёная — для ПСП 12 мс; тёмно-красная — для ПСП 48 мс; берёзовая (голубая) кривая — эталонная переходная характеристика. Добавление регуляризации улучшает устойчивость решений, особенно в низкочастотных зонах. ПСП-сигналы показывают более близкое соответствие эталону по всему спектру, что подтверждает их эффективность в условиях реального сейсмического шума.

С точки зрения выбора управляющего сигнала для метода взаимной корреляционной функции наилучшие результаты демонстрируют псевдослучайные последовательности (ПСП). Использование ПСП с длительностью импульса 3 или 12 мс, сглаженных с применением оконной функции Хэмминга, обеспечивает более устойчивое поведение результатов к шумовым осцилляциям и артефактам. В случае деконволюции с регуляризацией ключевым отличием является то, что применение ПСП с длиной импульса 2 мс, также сглаженной оконной функцией, приводит к уменьшению ширины амплитудного пика, что, в свою очередь, позволяет более точно определить положение отражающей границы в разрезе.

#### §4.3 Анализ помехоподавления в рамках 1D моделирования вибросейсмических данных при зашумлении нескоррелированным сейсмическим сигналом

Для расширения анализа, охватывающего широкий спектр реализаций шумов, ранее описанный численный эксперимент был воспроизведён в трёх режимах: одиночного импульса длительностью 100 мс, псевдослучайной последовательности с квазипрямоугольными импульсами по 5 мс, а также частотно-модулированного (ЧМ) свип-сигнала. Все модели были применены к массиву из 23 синтетических сейсмотрасс, формирующих обобщённую сейсмограмму типа ОГТ. Для каждого случая поверх имитированных трасс накладывались сегменты реального шумового сигнала, заимствованные из открытой базы данных Геологической службы США (<https://certmapper.cr.usgs.gov/data/apps/npra/>). При этом моделирование проводилось для трёх уровней шумового воздействия (А, В, С), различающихся по амплитудному масштабу с коэффициентами 1, 2.5 и 10 соответственно.

Ввиду высокой изменчивости шумовых характеристик как во времени, так и по трассам, усреднение отношения сигнал/шум (SNR) по всему массиву не представляется информативным. Однако общее представление о выраженности шумовой составляющей на фоне полезного отклика можно получить, обратившись к верхним панелям рисунков 4.9–4.11, где представлены исходные сейсмотрассы с наложенным шумом. Анализ результатов, приведённый на нижних панелях тех же рисунков, позволяет выделить ряд закономерностей [Алексеев и др., 2023].

При уровне зашумления А режим одиночных импульсов обеспечивает уверенное выделение откликов от первых шести отражающих границ на большинстве трасс (рис. 4.9, внизу), однако седьмая граница, как правило, оказывается замаскированной шумами. В случае ЧМ свип-сигнала деконволюция виброграммы позволяет восстановить импульсную переходную характеристику (ИПХ) с корректным положением и амплитудами пиков приблизительно на половине трасс (рис. 4.10, внизу). Применение ШПС свип-сигнала демонстрирует наиболее устойчивый результат: деконволюция обеспечивает практически

идеальное восстановление сигнала даже на тех трассах, где уровень шумов сравним с уровнем полезного сигнала или превышает его (рис. 4.11, внизу).

При увеличении зашумления до уровня В эффективность одиночных импульсов снижается — на половине трасс удаётся выделить лишь 3–4 отражения, остальные оказываются скрытыми помехами (рис. 4.9, внизу). Деконволюция ЧМ виброграммы позволяет в большинстве случаев реконструировать отражения от 4–5 верхних границ, тогда как шестая проявляется лишь эпизодически, а седьмая практически не обнаруживается (рис. 4.10, внизу). В то же время, режим ШПС сохраняет высокую точность восстановления ИПХ практически для всех трасс, за исключением одной с особенно низким уровнем SNR (рис. 4.11, внизу).

Наконец, при самом высоком уровне шума (режим С) использование одиночных импульсов оказывается неэффективным: практически ни на одной трассе не удаётся выделить полезные отражения (рис. 4.9, внизу). Применение ЧМ свипа позволяет извлечь пики ИПХ лишь для первых двух-трёх отражений и только на ограниченном числе трасс (рис. 4.10, внизу). В то же время, деконволюция ШПС сигнала продолжает обеспечивать точную реконструкцию ИПХ практически на всём массиве, за исключением уже упомянутой трассы с экстремальным уровнем зашумления (рис. 4.11, внизу) [Алексеев и др., 2023].

Таким образом, результаты численного моделирования свидетельствуют о значительных различиях в качестве восстановления сигнала при использовании различных типов управляющих сигналов: применение ШПС сигналов в сочетании с деконволюцией обеспечивает существенное преимущество в помехозащищённости по сравнению с традиционными ЧМ сигналами, обеспечивая прирост отношения сигнал/шум вплоть до десятикратного и более.

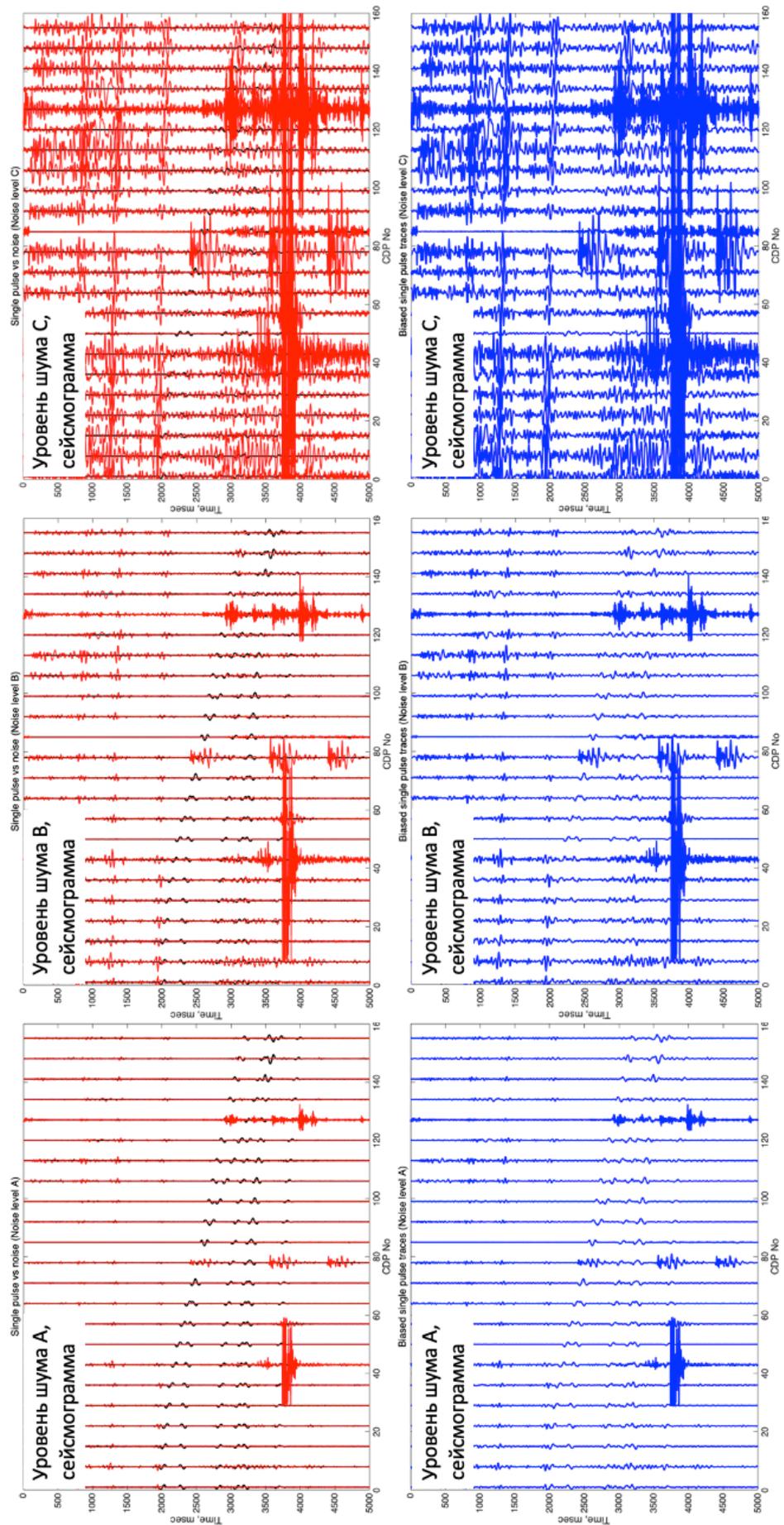


Рисунок 4.9 – Синтетические сейсмограммы ОГТ в режиме одиночного импульса (черные кривые) и аддитивный шум (красные кривые); результат зашумления (синие кривые).

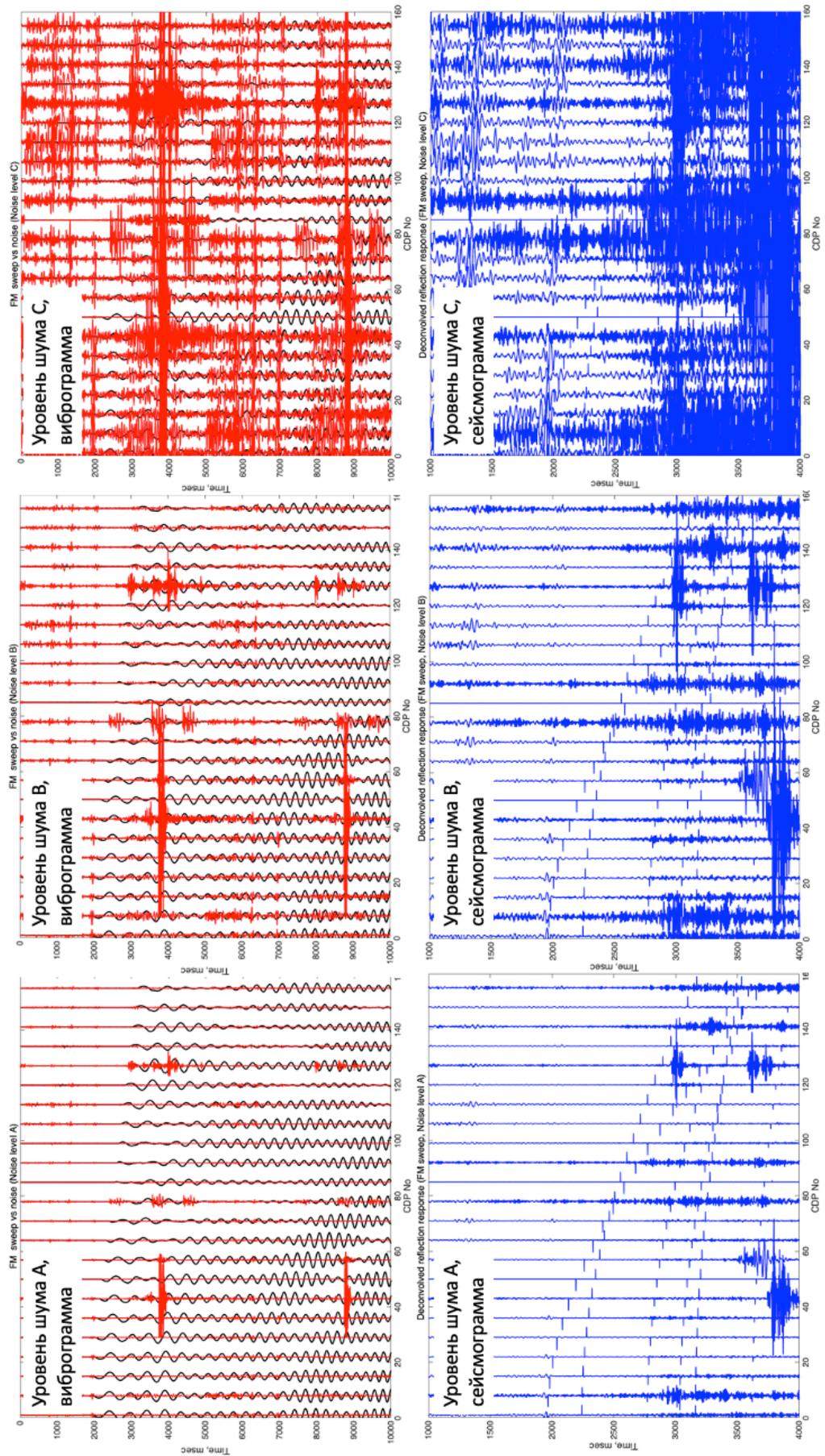


Рисунок 4.10 – Синтетические виброграммы ОГТ в режиме частотно-модулированного свип-сигнала (черные кривые) и аддитивный шум (красные кривые); результаты деконволюции синтетической сейсмограммы ОГТ в режиме ЧМ свип-сигнала с добавлением аддитивного шума (синие трассы).

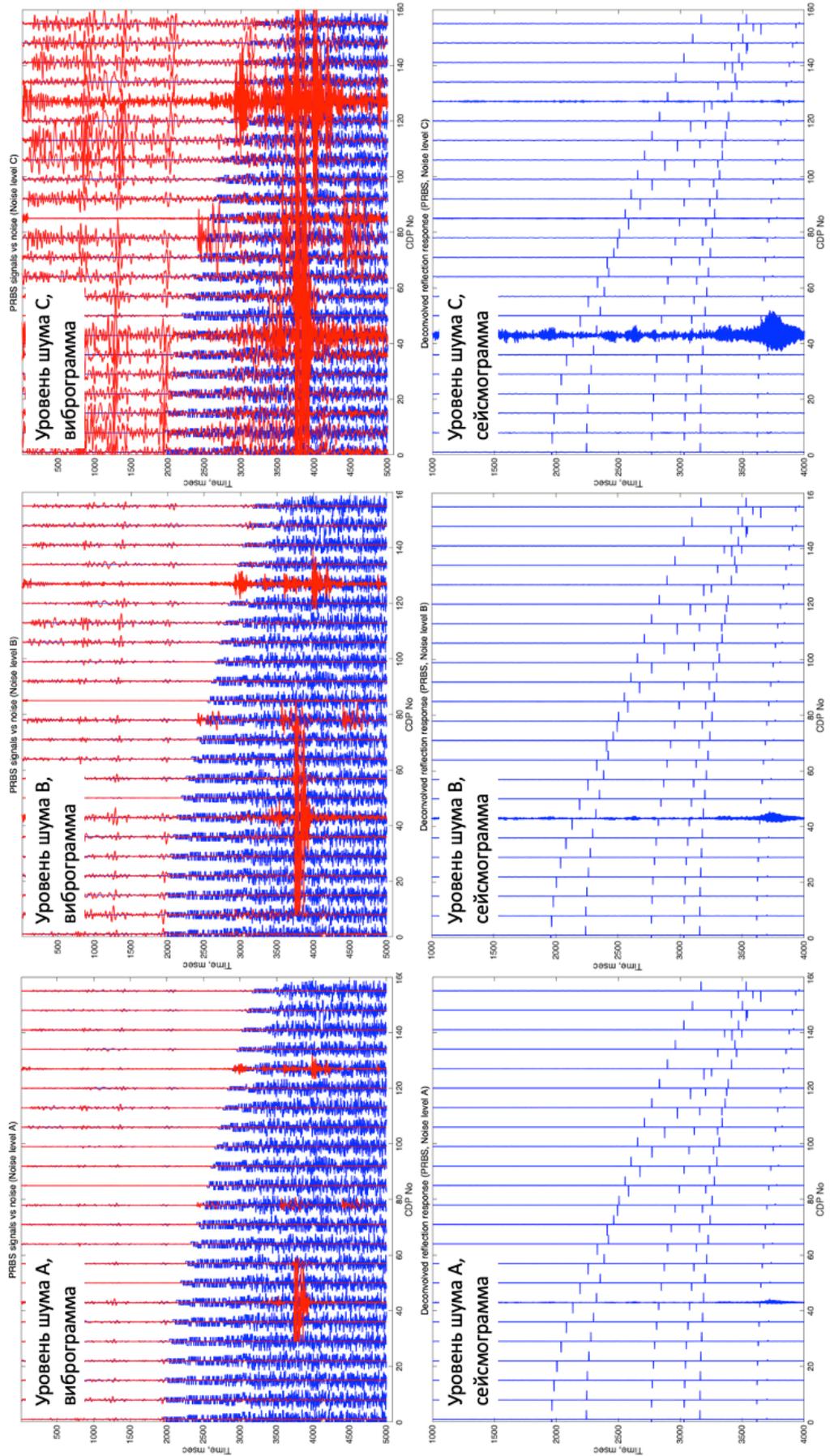


Рисунок 4.11 – Синтетические виброграммы ОГТ в режиме ПСКП (ШПС, синие кривые) и аддитивный шум (красные кривые); результаты деконволюции в режиме ШПС с добавлением аддитивного шума (синие трассы).

В рамках проведенного эксперимента наилучшее качество деконволюции было отмечено при использовании 5 мс-импульсов с прямыми фронтами, однако ухудшение результата при увеличении длительности импульсов и сглаживании их фронтов оказалось незначительным. Нужно отметить, что переход на ШПС-сигналы оставляет возможность использования аппарата корреляционной обработки, результаты которого также демонстрируют значительное преимущество перед соответствующими результатами в режиме ЧМ-свип в терминах локализации пиков ВКФ.

#### §4.4 Анализ эффективности применения псевдослучайных свип-сигналов на основе 2D моделирования виброрейсмических данных на примере модели мерзлых грунтов для района г. Салехард

В предыдущих параграфах было показано, что применение управляющего свип-сигнала на основе псевдослучайной последовательности (ПСП) демонстрирует определённые преимущества по сравнению с классическим частотно-модулированным сигналом в условиях одномерного (1D) моделирования данных вибрационной сейморазведки. Однако при переходе к двумерному (2D) моделированию ситуация может существенно меняться, поскольку в этом случае учитываются дополнительные параметры среды, в том числе геометрия латеральных неоднородностей и пространственная вариабельность физических свойств. В связи с этим, для более обоснованного сопоставления эффективности различных типов управляющих сигналов была построена синтетическая модель, отражающая характерные особенности верхней части геологического разреза для территории г. Салехард ЯНАО до глубины 200 м.

Выбор района обусловлен его инженерно-геологической спецификой г. Салехард располагается в зоне активной деградации многолетнемерзлых пород, что обуславливает повышенный риск деформаций оснований зданий и сооружений. В настоящий момент не существует универсальных геофизических методов, позволяющих с высокой точностью и разрешением картировать криолитозону под городской застройкой. Так, электромагнитные методы, в том числе электротомография, показывают высокую эффективность при работе в открытых тундровых условиях, однако в городской среде их применение затруднено вследствие наличия многочисленных искусственных проводников. Классические сейсмические методы также оказываются ограниченными из-за высокого уровня антропогенных шумов, транспортных вибраций и иных внешних возмущений. В этом контексте метод вибрационного зондирования с применением управляющих свип-сигналов, модулированных ПСП, рассматривается как перспективное направление, обеспечивающее повышенную помехоустойчивость и высокую чувствительность к мелкомасштабным неоднородностям.

В течение последнего десятилетия ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» осуществляет систематический мониторинг температурного режима многолетнемёрзлых пород в районе г. Салехард, включая зону застройки. В результате анализа данных температурных наблюдений установлено, что под рядом зданий сформированы искусственные зоны промороженных грунтов мощностью порядка 15 метров — на глубину заложения свайных оснований. Подстилающий геологический горизонт при этом характеризуется тальми условиями, что затрудняет интерпретацию геофизических данных и делает задачу картирования кровли природной мерзлоты особенно сложной при использовании непрямых методов (рис. 4.12).

Для имитации геологической структуры с несливающейся мерзлотой, характерной для Салехарда, была создана скоростная модель (рис. 4.13), содержащая три отражающие границы характеризующие реальные стратиграфические условия региона. В этой многослойной среде представлены: мерзлый суглинок (мощность 15 м, скорость упругой волны 2.4 км/с, плотность 1.8 г/см<sup>3</sup>), талый суглинок (мощность 25 м, скорость 1.2 км/с, плотность 1.84 г/см<sup>3</sup>), мерзлые пески (мощность 100 м, скорость 2.8 км/с, плотность 2.1 г/см<sup>3</sup>) и мерзлый суглинок (мощность 150 м, скорость 2.4 км/с, плотность 1.8 г/см<sup>3</sup>).

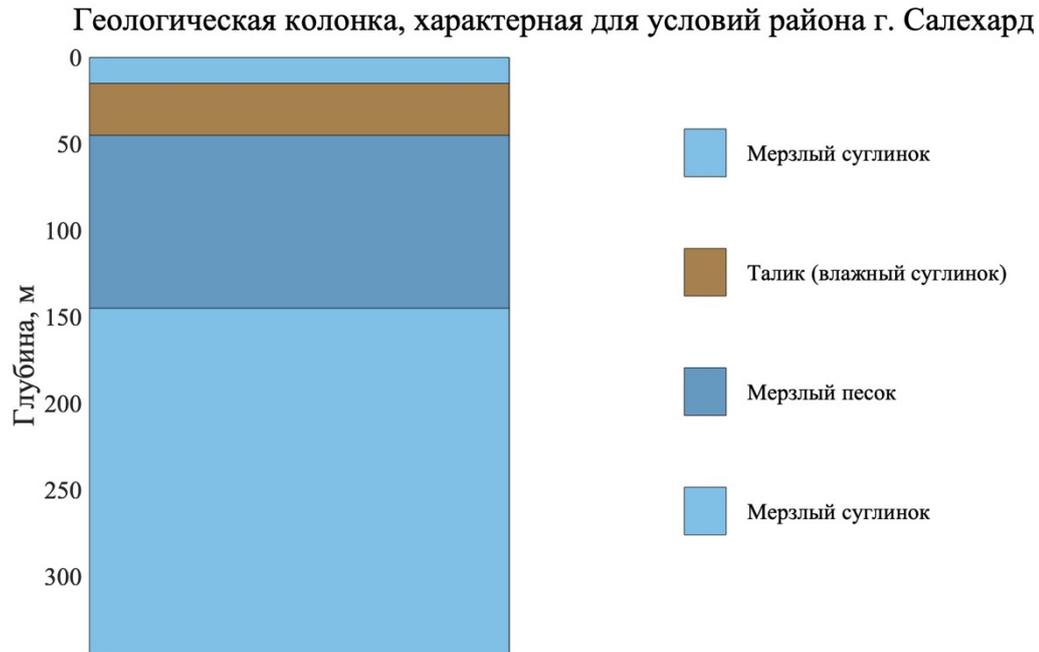


Рисунок 4.12 – Инженерно-геологическая структура, характерная для условий индустриальной застройки в г. Салехард с учётом влияния сезонно охлаждающих устройств (СОУ). В верхней части разреза залегают многолетнемерзлые грунты мощностью до 15 м, ниже которых расположен талик толщиной до 30 м. Подстилающие горизонты представлены повторно промёрзшими породами, преимущественно мерзлыми песками и суглинками.

Таким образом, построенная модель учитывает стратиграфические особенности региона и может быть использована для оценки информативности вибросейсмических данных с различными управляющими сигналами.

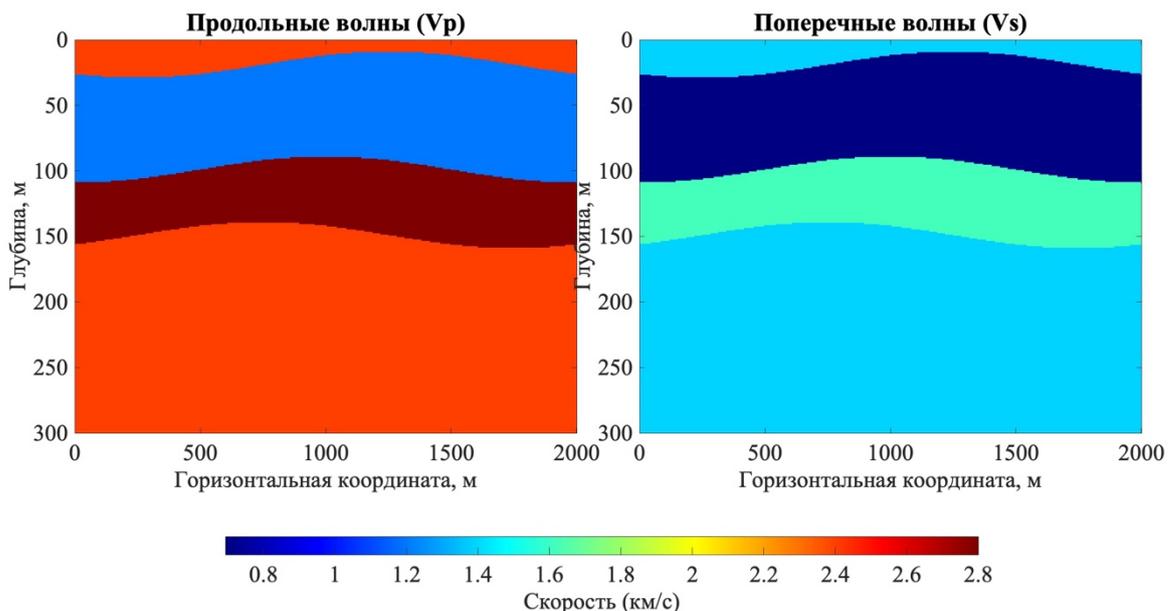


Рисунок 4.13 – Синтетическая скоростная модель, характерная для верхней части разреза в районе в г. Салехард (ЯНАО). Справа – разрез скорости продольных волн, справа – поперечных волн.

На следующем этапе моделирования были сформированы три управляющих сигнала, аналогичные тем, что применялись при 1D-моделировании. Первый сигнал представляет собой высокочастотный импульс Рикера с опорной частотой 1000 Гц и характерной длительностью около 1 мс. Второй сигнал – это традиционный частотно-модулированный свип-сигнал с линейным изменением частоты от 10 до 150 Гц и общей длительностью 25 с. Третий свип-сигнал построен на основе двоичной М-последовательности с длиной импульса 12 мс с использованием окна Хэмминга. Общая длительность рассмотренных свип-сигналов составляла 25 с. (рис. 4.14).

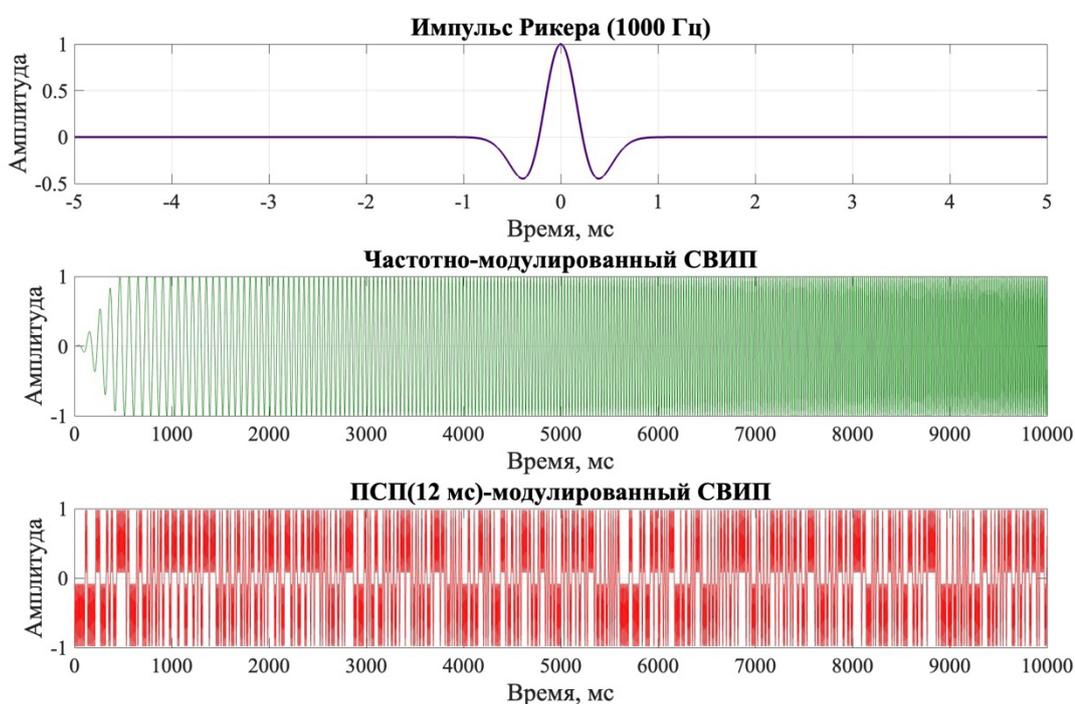


Рисунок 4.14 – Управляющие сигналы механической нагрузки, применяемые в моделировании данных вибрационной сейсморазведки. Синяя кривая — импульс Рикера с центральной частотой 1000 Гц, Зелёная кривая — частотно-модулированный свип-сигнал с частотой модуляции от 10 до 150 Гц. Красная кривая — свип-сигнал на основе двоичной М-последовательности с длительностью импульса 12 мс, сглаженный с использованием окна Хэмминга.

Выбор указанных типов управляющих сигналов обусловлен представлениями об их эффективности, полученными ранее в рамках 1D моделирования, что обеспечивает возможность дальнейшего сравнения в 1D и 2D-конфигурациях. Импульс Рикера, обладающий высокой временной локализацией и компактной автокорреляционной функцией, традиционно применяется в

численном моделировании в качестве эталонного возбуждения [Ампиров, Ю. П., 2008]. Он позволяет оценить отклик среды без наложения эффектов, связанных с длительностью сигнала и послесвечением.

Частотно-модулированный линейный свип-сигнал, напротив, представляет собой наиболее широко используемую форму возбуждения в реальных полевых условиях. Его широкополосный спектр обеспечивает чувствительность к различным глубинным уровням геологического разреза. Однако специфическая форма его автокорреляционной функции, характеризующаяся протяжёнными и слабо затухающими боковыми лепестками, может существенно осложнять выделение отражённых волн в условиях высокого уровня шумов или сложной многослойной среды.

В качестве альтернативы традиционному ЧМ-свип-сигналу был использован управляющий сигнал, сформированный на основе псевдослучайной бинарной  $m$ -последовательности с элементарным импульсом длительностью 12 мс, сглаженным при помощи оконной функции Хэмминга. Такой тип сигнала обладает рядом существенных преимуществ: автокорреляционная функция, представленная на рисунке 4.15, характеризуется узким и симметричным главным лепестком при низком уровне и быстром затухании боковых лепестков, что обеспечивает высокую временную разрешающую способность и устойчивость к наложению шумов. Дополнительным преимуществом является возможность формирования взаимно ортогональных сигналов, что особенно важно при реализации синхронного возбуждения с использованием нескольких вибраторов.

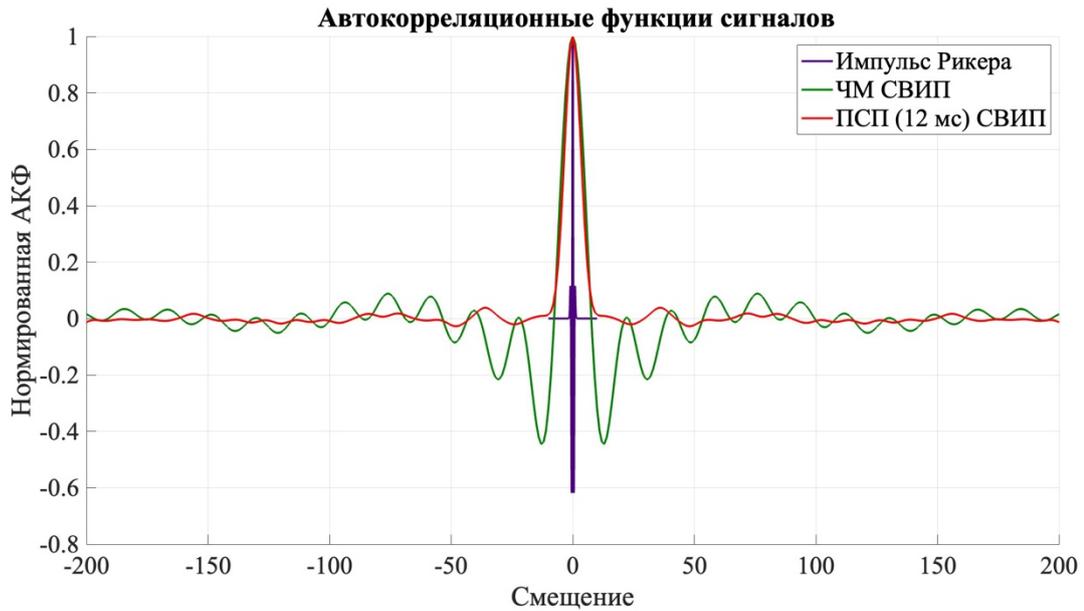


Рисунок 4.15 – Управляющие сигналы механической нагрузки, применяемые в моделировании данных вибрационной сейсморазведки. Синяя кривая — импульс Рикера с центральной частотой 1000 Гц. Зелёная кривая — частотно-модулированный свип-сигнал с частотой модуляции от 10 до 150 Гц. Красная кривая — свип-сигнал на основе двоичной M-последовательности с длительностью импульса 12 мс, сглаженный с использованием окна Хэмминга.

Применение окна Хэмминга позволяет устранить резкие фронты в структуре сигнала, снизить спектральные выбросы и тем самым приблизить его форму к условиям реального возбуждения механических колебаний, что повышает практическую значимость моделируемого воздействия.

Таким образом, каждый из рассматриваемых управляющих сигналов представляет собой типичный и физически обоснованный представитель соответствующего класса возбуждения. Это обеспечивает возможность объективной оценки влияния формы сигнала на эффективность зондирования, в том числе в условиях, приближённых к реальным геологическим условиям района города Салехард.

На следующем этапе моделирования было выполнено численное моделирование распространения сейсмических волн в построенной среде с использованием различных положений источника. В качестве инструмента численного решения использовалась вычислительная библиотека Devito (<https://www.devitoproject.org/>), реализующая решение двумерных уравнений Ламе методом конечных разностей. Распространение упругих волн описывалось системой уравнений Ламе в форме первых производных по времени:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \nabla * \tau \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = \lambda \nabla * v + \mu (\nabla v + (\nabla v)^T) \quad (4.10)$$

где  $v$ - вектор скорости смещения;  $\tau$ - тензор напряжений,  $\rho$ - плотность среды;  $\lambda$ ,  $\mu$ - первый и второй параметры Ламе.

Для численного решения используется метод конечных разностей. Для аппроксимации производной по времени используется явная схема первого порядка:

$$\frac{\partial v}{\partial t} \approx \frac{v^{n+1} - v^n}{dt} \quad (4.11)$$

Для пространственных производных используется схема восьмого порядка, которая включает несколько соседних узлов для уменьшения численной дисперсии. Для первой производной по горизонтальной и вертикальной координате разностная схема имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau}{\partial x} &\approx \frac{\frac{-1}{560\tau_{i-4,j}} + \frac{8}{315\tau_{i-3,j}} - \frac{1}{5\tau_{i-2,j}} + \frac{8}{5\tau_{i-1,j}} - \frac{205}{72\tau_{i,j}}}{dx} \\ &\quad + \frac{\frac{8}{5\tau_{i+1,j}} - \frac{1}{5\tau_{i+2,j}} + \frac{8}{315\tau_{i+3,j}} - \frac{1}{560\tau_{i+4,j}}}{dx} \\ \frac{\partial \tau}{\partial z} &\approx \frac{\frac{-1}{560\tau_{i-4,j}} + \frac{8}{315\tau_{i-3,j}} - \frac{1}{5\tau_{i-2,j}} + \frac{8}{5\tau_{i-1,j}} - \frac{205}{72\tau_{i,j}}}{dx} \\ &\quad + \frac{\frac{8}{5\tau_{i+1,j}} - \frac{1}{5\tau_{i+2,j}} + \frac{8}{315\tau_{i+3,j}} - \frac{1}{560\tau_{i+4,j}}}{dx} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Для каждого типа управляющего сигнала было смоделировано 50 виброграмм общего пункта возбуждения (ОПВ), соответствующих различным положениям источника вдоль рассматриваемого профиля скоростной модели, из которых путем выбора трасс для совмещенных источников и приемников была сформирована результирующая виброграмма (рис. 4.16).

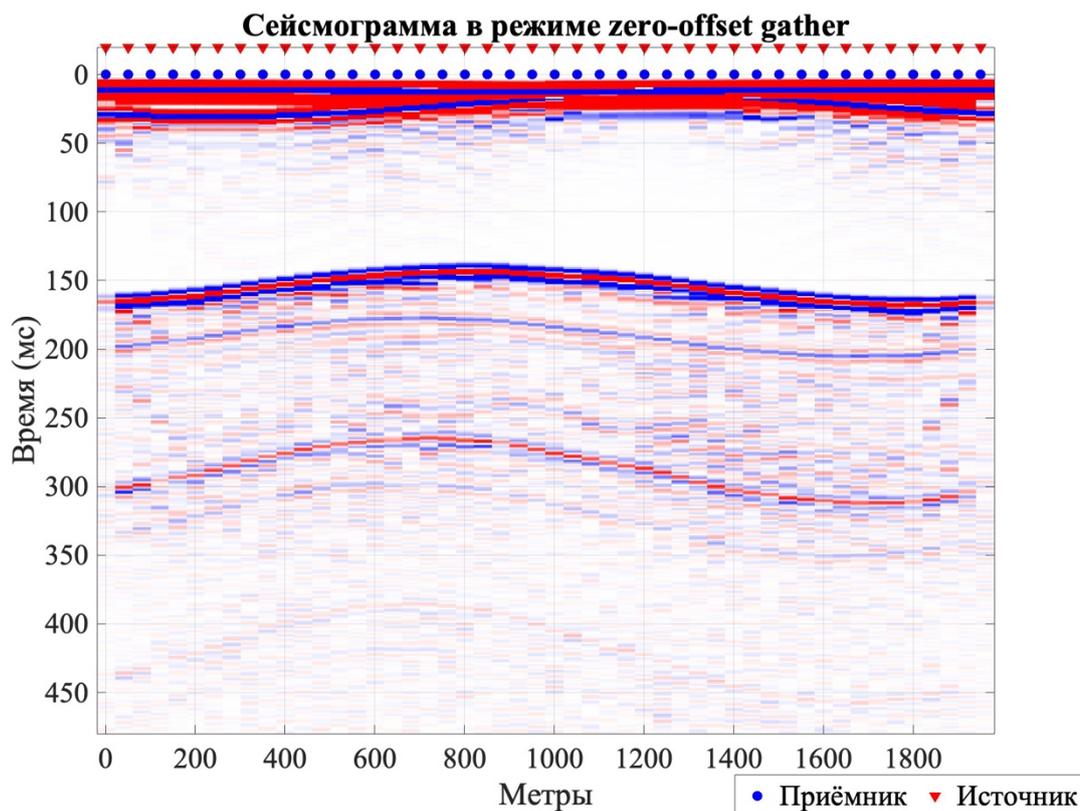


Рисунок 4.16 – Сейсмограмма для управляющего сигнала в виде импульса Рикера, полученная в результате моделирования по схеме zero-offset gather с 50 совмещёнными источниками и приёмниками.

Затем методом кросс-корреляции полученных виброграмм с управляющими сигналами были восстановлены соответствующие сейсмические изображения для двух рассмотренных управляющих сигналов (рис. 4.17). Как видно из сейсмограмм, все управляющие сигналы позволяют выделить основные слои модели. Однако использование классического частотно-модулированного свип-сигнала на поздних временах приводит к снижению отношения сигнал/шум, что затрудняет или делает невозможной дальнейшую интерпретацию коррелограмм.

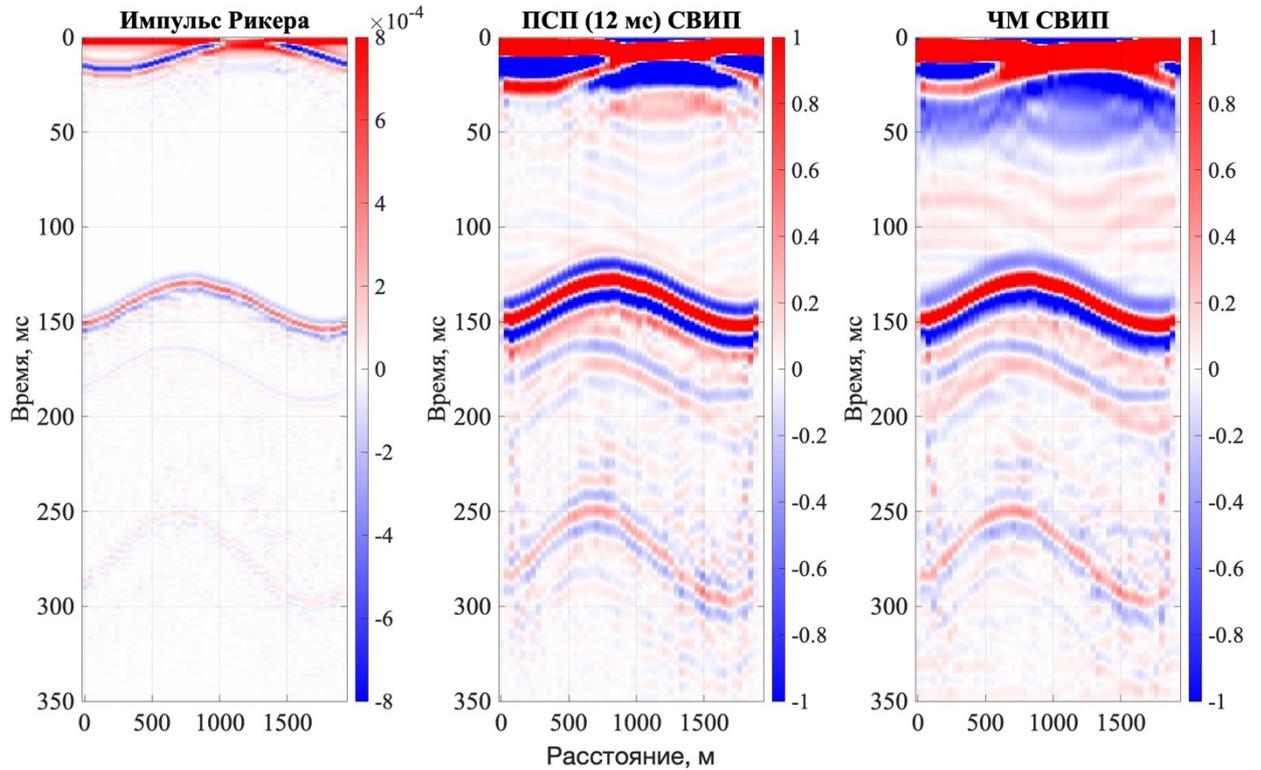


Рисунок 4.17 – Сейсмические изображения для трёх рассмотренных управляющих сигналов без искусственного зашумления. Слева: сейсмограмма для импульса Рикера; в центре: коррелограмма для частотно-модулированного (ЧМ) свип-сигнала; справа: коррелограмма для свип-сигнала, построенного на основе двоичной псевдослучайной последовательности с длиной импульса 12 мс, сглаженной с использованием окна Хэмминга.

Для оценки помехоподавления при использовании различных вариантов управляющего свип-сигнала к синтезированным сейсмограммам был добавлен сигнал реального (экспериментально-зарегистрированного) шума, зарегистрированного группой геофизиков из ФГАОУ ВО «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» в рамках сейсморазведочных работ в районе квартала «Ямальский» в г. Салехард (рис. 4.18).

Из общей записи шума случайным образом отбирались фрагменты длительностью 25 с, которые накладывались на синтезированные вибротрассы с разными уровнями зашумления (SNR): -4 дБ, -7 дБ и -10 дБ. Согласно следующим выражениям:

$$\text{SNR}_{\text{дБ}} = 10 * \log_{10}\left(\frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}\right) \quad (4.13)$$

где  $P_{\text{signal}}$  — мощность сигнала;  $P_{\text{noise}}$  — мощность шума, а в свою очередь  $P_{\text{signal}}$  определяется так:

$$P_{\text{signal}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s[n]^2 \quad (4.14)$$

где  $s[n]$  — отсчеты сигнала, а  $N$  — длина сигнала;

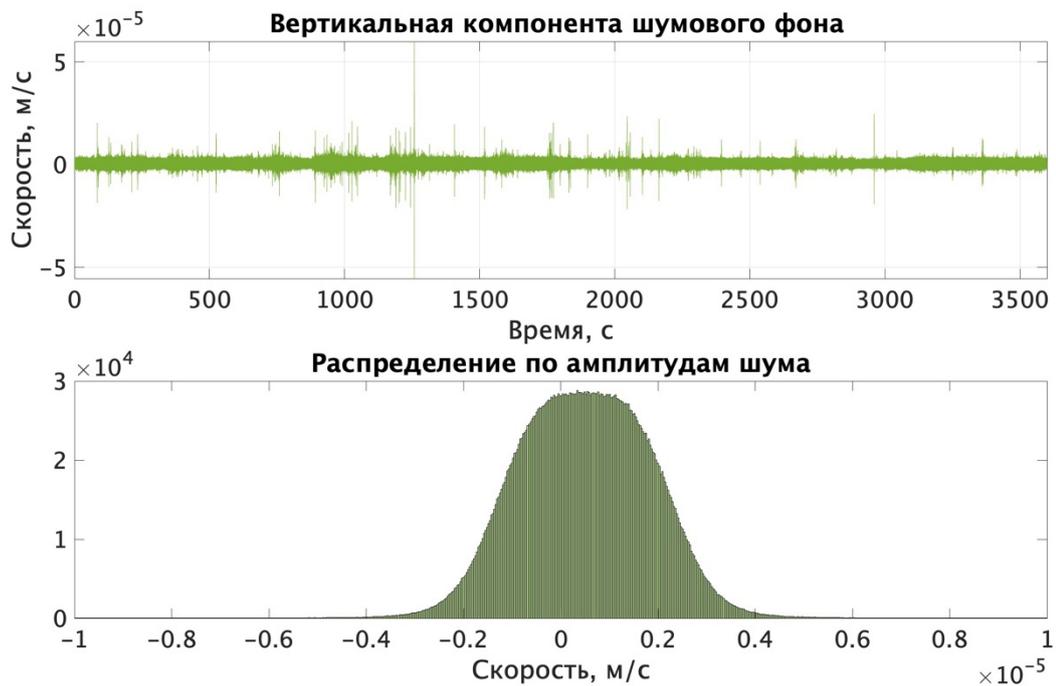


Рисунок 4.18 – Шумовой фон, записанный в районе квартала «Ямальский» в г. Салехард, Ямало-Ненецкий автономный округ. В верхней части рисунка представлена непрерывная запись шума в течение часа, а в нижней – его амплитудное распределение.

Затем, с использованием кросс-корреляции, строились сейсмограммы основных отражений в диапазоне времен 0–500 мс. Результаты кросс-корреляции представлены на рисунках 4.19–4.21.

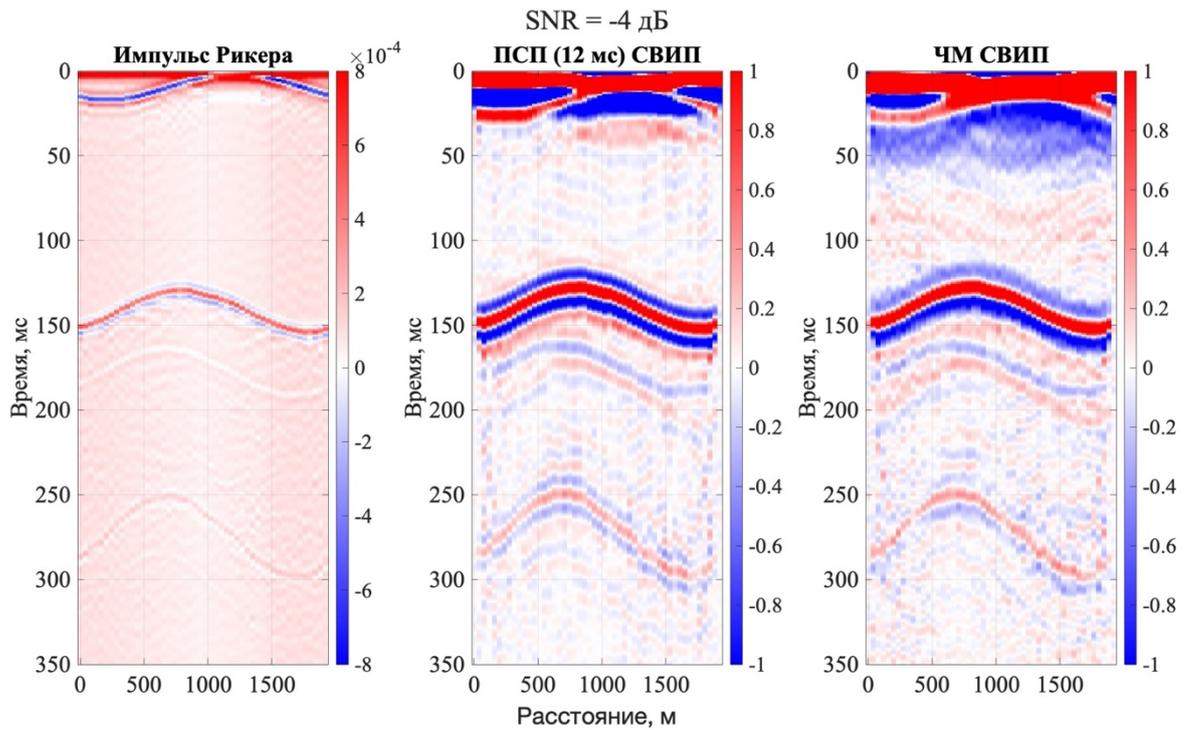


Рисунок 4.19 – Сейсмические изображения для трёх рассмотренных управляющих сигналов при уровне зашумления, соответствующем отношению сигнал/шум -4 дБ. Слева: сейсмограмма для импульса Рикера; в центре: коррелограмма для частотно-модулированного (ЧМ) свип-сигнала; справа: коррелограмма для свип-сигнала, построенного на основе двоичной псевдослучайной последовательности с длиной импульса 12 мс, сглаженной с использованием окна Хэмминга.

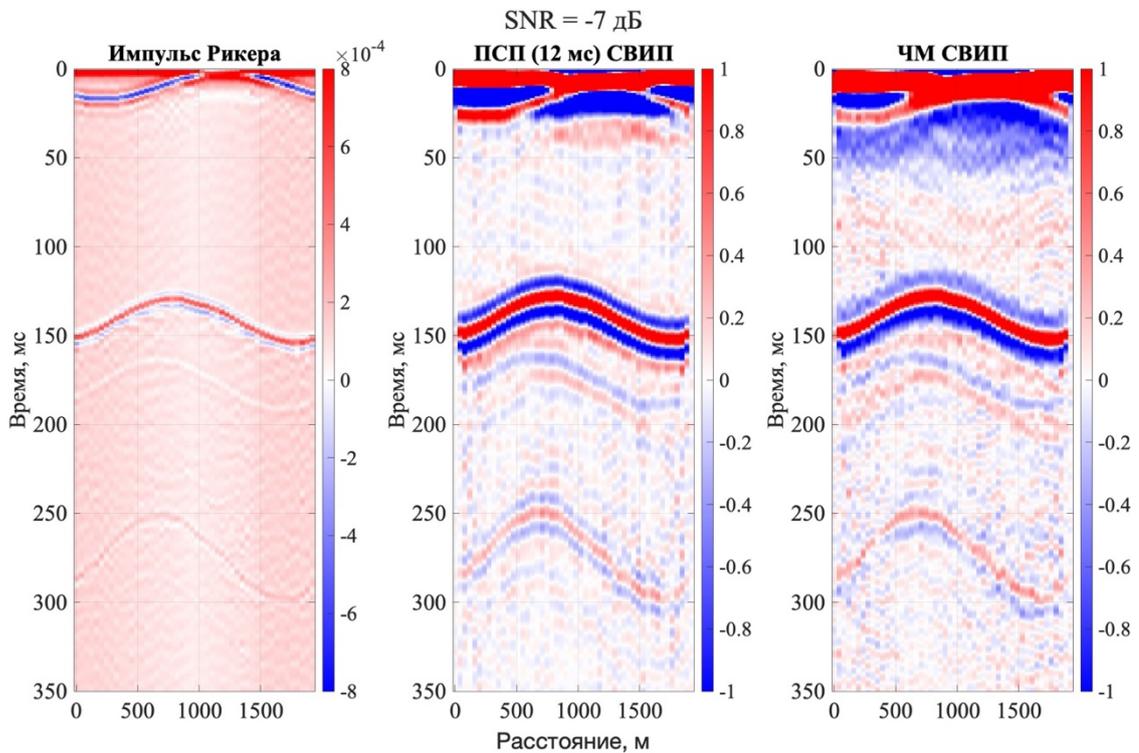


Рисунок 4.20 – Сейсмические изображения для трёх рассмотренных управляющих сигналов при уровне зашумления, соответствующем отношению сигнал/шум -7 дБ. Слева: сейсмограмма для импульса Рикера; в центре: коррелограмма для частотно-модулированного (ЧМ) свип-сигнала; справа: коррелограмма для свип-сигнала, построенного на основе двоичной псевдослучайной последовательности с длиной импульса 12 мс, сглаженной с использованием окна Хэмминга.

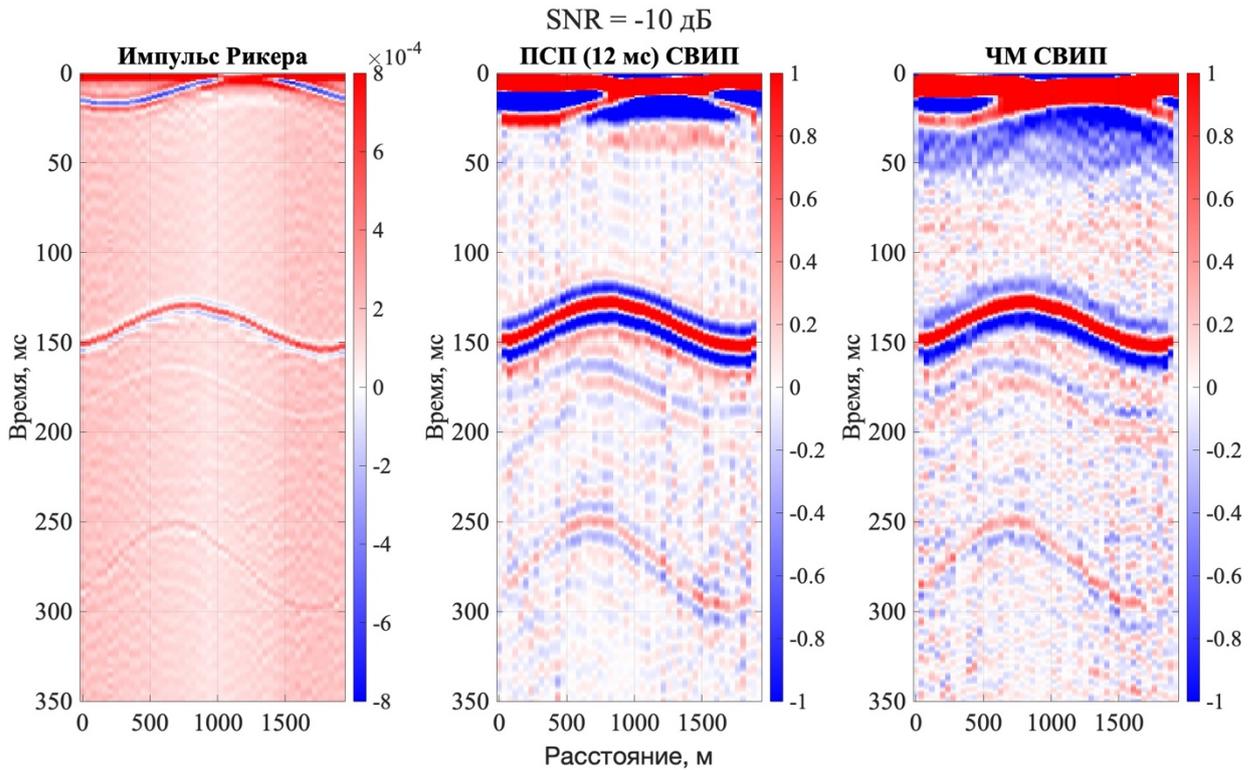


Рисунок 4.21 – Сейсмические изображения для трёх рассмотренных управляющих сигналов при уровне зашумления, соответствующем отношению сигнал/шум -10 дБ. Слева: сейсмограмма для импульса Рикера; в центре: коррелограмма для частотно-модулированного (ЧМ) свип-сигнала; справа: коррелограмма для свип-сигнала, построенного на основе двоичной псевдослучайной последовательности с длиной импульса 12 мс, сглаженной с использованием окна Хэмминга.

Как видно из представленных выше коррелограмм, все три управляющих сигнала позволяют достаточно точно локализовать границы модели и картировать переход от многолетнемёрзлых пород к таликовой зоне (первая граница в модели). Однако при использовании традиционного частотно-модулированного СВИП-сигнала отношение сигнал/шум заметно ниже по сравнению с сигналом, модулированным на основе двоичной М-последовательности, что выражается в виде усиленной мозаичности соответствующих коррелограмм и несколько более широких (по времени) областей, содержащих полезные отражения для каждой из границ скоростной модели. Это также хорошо видно на рисунке 4.22, где для одного из пунктов приема построены три сеймотрассы, нормированные по амплитуде сигнала на первой границе. Из рисунка отчетливо видно, что амплитуда полезного сигнала при использовании СВИП-сигнала, модулированного на основе двоичной М-последовательности, выше, чем при применении традиционного СВИП-сигнала при всех уровнях синтетического зашумления.

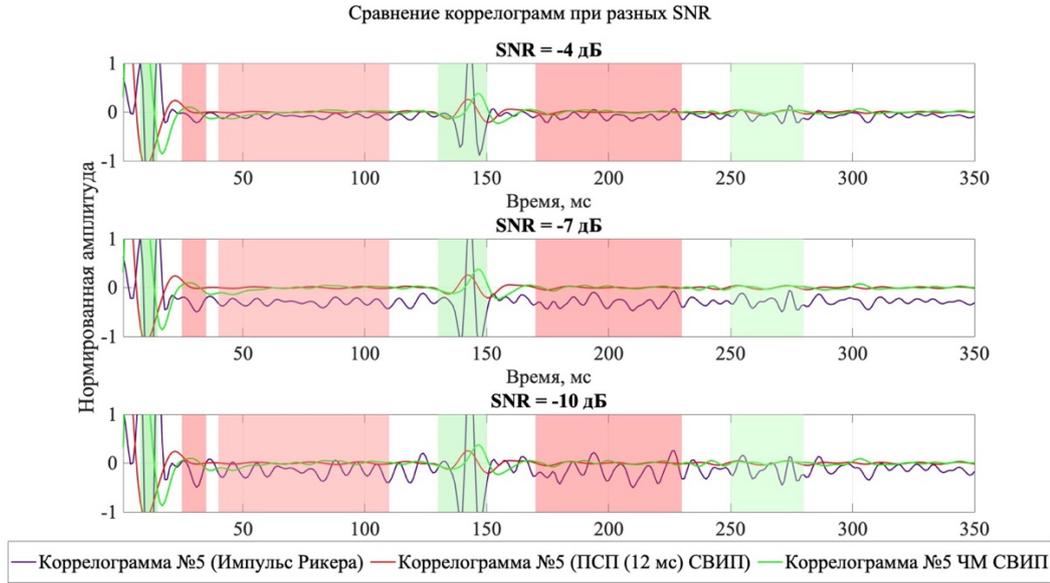


Рисунок 4.22 – Сейсмограммы для одного из приемников, нормированные по амплитуде сигнала на первой границе.

Красная кривая – коррелограмма для частотно-модулированного (ЧМ) СВИП-сигнала. Зеленая кривая – коррелограмма для СВИП-сигнала, построенного на основе двойной псевдослучайной последовательности с длиной импульса 12 мс, сглаженной с использованием окна Хэмминга. Фиолетовая кривая – сейсмограмма для импульса Рикера; Красными зонами отмечены интервалы, в которых преобладает шум; зелеными - интервалы с преобладанием полезных отражений.

Для подтверждения выводов, сделанных выше на качественном уровне, была проведена количественная оценка показателей помехоподавления. В частности, для каждой сейсмограммы рассчитаны усреднённые среднеквадратичные значения отношения сигнал/шум на каждой из границ (Таблица 4.2) в соответствии со следующими формулами:

$$\partial_{1 \text{ граница}} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \frac{\alpha_i}{\beta_i} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \frac{\sqrt{\frac{1}{8} \sum_{t=8}^{15} \text{Corr}_{it}^2}}{\sqrt{\frac{1}{20} \sum_{t=30}^{49} \text{Corr}_{it}^2}} \quad (4.15)$$

$$\partial_{2 \text{ граница}} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \frac{\alpha_i}{\beta_i} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \frac{\sqrt{\frac{1}{71} \sum_{t=130}^{150} \text{Corr}_{it}^2}}{\sqrt{\frac{1}{21} \sum_{t=110}^{140} \text{Corr}_{it}^2}} \quad (4.16)$$

$$d_{3 \text{ граница}} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \frac{\alpha_i}{\beta_i} = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} \sqrt{\frac{\frac{1}{31} \sum_{t=250}^{280} \text{Corr}_{it}^2}{\frac{1}{41} \sum_{t=170}^{210} \text{Corr}_{it}^2}} \quad (4.17)$$

где  $\text{Corr}_{it}$ - коэффициент корреляции, зависящий от времени (t) в мс; i — номер сейсмоотрассы. Временной лаг для сигналов, отражённых от границ, варьируется в диапазоне от 8 до 15 мс для первой границы, от 130 до 150 мс для второй и от 250 до 280 мс для третьей. На временных интервалах 30-49, 110-140, 170-210 мс преобладает шумовой фон (рис. 4.22).

В результате количественной оценки было установлено, что использование управляющего СВИП-сигнала, построенного на основе двоичной псевдослучайной последовательности с длиной импульса 12 мс, сглаженной окном Хэмминга, приводит к увеличению отношения сигнал/шум в среднем в 1,9 раза для отражений от первой границы, в 2,8 раза для отражений от второй границы и в 1,2 раза для отражений от третьей границы по сравнению с отношением сигнал/шум, полученным при использовании традиционного ЧМ-СВИП-сигнала при таких же уровнях зашумления.

SNR = -4дБ		
	ПСП (12мс) СВИП	ЧМ СВИП
Соотношение сигнал/шум для отражений от первой границы	28.1367	14.6454
Соотношение сигнал/шум для отражений от второй границы	12.3311	4.0559
Соотношение сигнал/шум для отражений от третьей границы	1.2465	1.0526
SNR = -7дБ		
Соотношение сигнал/шум для отражений от первой границы	27.8081	14.5970
Соотношение сигнал/шум для отражений от второй границы	11.1479	3.9406
Соотношение сигнал/шум для отражений от третьей границы	1.2275	1.0287
SNR = -10дБ		
Соотношение сигнал/шум для отражений от первой границы	27.1632	14.4886
Соотношение сигнал/шум для отражений от второй границы	9.5429	3.7422
Соотношение сигнал/шум для отражений от третьей границы	1.1934	1.0002

Таблица 4.2 – Соотношение сигнал/шум для трех временных интервалов сейсмограммы (коррелограммы), соответствующих вступлениям Р-волн, отраженным от трех границ рассматриваемой скоростной для двух типов управляющих сигналов при разных уровнях зашумления полезного сигнала.

Применение псевдослучайных кодовых последовательностей в качестве управляющего сигнала для вибрационной сейсморазведки на моделях среды, аналогичных геологическим структурам района г. Салехард, показало свою эффективность. Проведённое численное моделирование продемонстрировало, что использование СВИП-сигнала, модулированного на основе двоичной М-последовательности с длиной импульса 12 мс и сглаженного окном Хэмминга, позволяет значительно повысить отношение сигнал/шум по сравнению с классическим частотно-модулированным СВИП-сигналом. Это проявляется в более чётком выделении границ геологических слоёв даже при высоком уровне зашумления. Таким образом, применение псевдослучайных кодовых последовательностей в качестве модулирующего сигнала для вибрационного зондирования позволяет повысить точность и достоверность сейсморазведочных данных.

#### §4.5 Основные выводы

Во второй главе выполнен модельный анализ, направленный на повышение эффективности вибрационной сейсморазведки за счёт применения псевдослучайных кодовых последовательностей (ПСП) в качестве управляющих сигналов. В рамках работы проводилось как одномерное, так и двумерное моделирование виброграмм, а также сравнительный анализ корреляционной и деконволюционной обработки.

На этапе одномерного моделирования с использованием восьмислойной модели среды было установлено, что применение ПСП, сглаженных окном Хэмминга, позволяет достичь более эффективного подавления шумов по сравнению с традиционными частотно-модулированными (ЧМ) СВИП-сигналами. Особенно хорошо это проявляется при длине элементарного импульса 3 и 12 мс, при которых обеспечивается оптимальное соотношение между временной локализацией отражений и устойчивостью к шумовым искажениям.

Параллельно была проведена оценка эффективности двух методов восстановления отклика среды — метода взаимной корреляции и деконволюции с регуляризацией Тихонова. Несмотря на теоретическую строгость и математическую обоснованность, деконволюция не продемонстрировала существенного прироста точности по сравнению с методом взаимной корреляции. Более того, деконволюционный подход требует значительно больше вычислительных ресурсов, что делает его менее предпочтительным в полевых условиях, где критична скорость обработки данных.

Двумерное численное моделирование, проведённое на основе скоростной модели, отражающей геологическую структуру в районе города Салехард, позволило подтвердить ранее полученные выводы. Было показано, что использование управляющего СВИП-сигнала, сформированного на основе двоичной псевдослучайной последовательности с длиной импульса 12 мс и сглаженного функцией Хэмминга, приводит к значительному увеличению отношения сигнал/шум. Так, в среднем оно возросло в 1,9 раза для отражений от

верхней границы мерзлоты, в 2,8 раза — для отражений от перехода к талику и в 1,2 раза — для глубинной границы, по сравнению с результатами, полученными при использовании классического ЧМ-СВИП-сигнала.

Анализ коррелограмм показал, что сигналы на основе ПСП обеспечивают более чёткое выделение отражённых волн даже при высоком уровне зашумления. Это особенно актуально для условий городской застройки, где традиционные методы, как правило, страдают от высокого уровня антропогенных помех и ограничений по типу возбуждающего воздействия.

Таким образом, результаты, представленные во второй главе, подтверждают перспективность использования псевдослучайных кодовых последовательностей в качестве управляющих сигналов для задач вибрационного зондирования. Выявленные преимущества ПСП, включая высокую помехоустойчивость и улучшенную временную разрешающую способность, делают этот подход особенно актуальным для инженерно-геофизических задач в Ямало-Ненецком автономном округе, в том числе для мониторинга состояния многолетнемёрзлых пород в зоне городской застройки г. Салехард.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе решения поставленных в работе задач выполнена теоретическая оценка эффективности использования псевдослучайных (шумоподобных) сигналов источника применительно к морской системе импульсной электроразведки и вибрационной сейсморазведки; разработаны алгоритмы и программный код для обработки соответствующих данных. Основные выводы и результаты диссертации состоят в следующем:

1. Проведено моделирование большого набора данных, отражающих поведение полезного сигнала в геоэлектрических условиях, типичных для зоны Арктического шельфа России (море Лаптевых).
2. Проанализированы записи электромагнитного зондирования, полученные в море Лаптевых в рамках рейса АМК-82; выделены кривые становления поля и временные ряды шума, характерные для условий съемки с буксируемой диполь-дипольной системой наблюдения.
3. Установлено, что основные помехи, вносящие искажения в записи зондирования становлением поля, регистрируемые с использованием буксируемой диполь-дипольной электроразведочной установки в условиях шельфа моря Лаптевых, имеют частотный диапазон от сотых долей до первых единиц Гц.
4. Получены оценки помехоподавления для морских систем импульсной электроразведки в условиях влияния характерных шумов с использованием стандартного метода накопления и режима с управляющими сигналами в виде псевдослучайных последовательностей импульсов тока с различной длительностью кодового элемента и формой несущей.
5. Показано, что использование псевдослучайных (шумоподобных) последовательностей импульсов тока в морской буксируемой системе малоглубинной импульсной электроразведки позволяет существенно улучшить помехоподавление и расширить неискаженный шумами диапазон переходной характеристики приблизительно в 1,5 раза по сравнению с традиционно-используемым режимом накопления.

6. В рамках численного моделирования полезного сигнала (виброграмм) и его зашумления экспериментально-зарегистрированным шумом, типичным для условий г. Салехард (ЯНАО), установлено, что использование свип-сигналов, основанных на шумоподобных последовательностях импульсов механической нагрузки в системах вибрационной сейсморазведки позволяет улучшить подавление нескоррелированных волн-помех и повысить детальность получаемых сейсмограмм по сравнению с традиционно используемыми свип-сигналами с линейной частотной модуляцией. Средний прирост уровня помехоподавления на рассмотренном наборе данных составил порядка 1.9 раза, что подтверждает эффективность предложенного подхода.
7. Разработаны и протестированы алгоритмы обработки данных для нового режима возбуждения геофизических систем. В рамках работы созданы программные инструменты для деконволюции и корреляционной обработки сигналов, полученных в режиме псевдослучайного возбуждения. Эти инструменты позволили восстановить кривые кажущегося сопротивления и сейсмограммы из зашумленных сигналов с высокой точностью, что подтвердило работоспособность предложенных методов на моделированных и полевых данных.

Таким образом, в рамках модельного анализа, выполненного на примере конкретных типов полезного сигнала и шума, относящихся к условиям Арктических регионов, показаны потенциальные преимущества применения шумоподобных сигналов источника в соответствующих геофизических системах. Такой анализ впервые проведен с единых позиций применительно к импульсной электроразведке и вибрационной сейсморазведке. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенные подходы могут быть эффективно применены для решения актуальных прикладных задач: более точного обнаружения зон эмиссии метана в донных отложениях мелководных акваторий Арктического шельфа, а также картирования состояния многолетнемерзлых пород под зданиями и сооружениями в северных городах.

Достигнутые научные результаты и полученные выводы соответствуют поставленной цели и обладают научно-практической значимостью для дальнейшего развития систем электромагнитной и сейсмической геофизики. Практическая реализация этих методов позволит повысить надежность интерпретации геофизических данных в указанных условиях, что может, в том числе, влиять на оценку природных и техногенных георисков.

В рамках дальнейшей работы планируется реализовать режим токового сигнала в форме ШПС в комплексе морской электроразведки компании “МГУ-Геофизика” на базе генератора тока “ТЭЛЭС-3Э” производства ООО «Геосигнал» с модулем дополнительной коммутации. Для обработки сигналов, получаемых с данной генераторной системой, будут использоваться алгоритмы и программное обеспечение, разработанные автором в рамках работы над диссертацией.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Алексеев Д.А., Кошурников А.В., Пушкарев П.Ю., Балихин Е.И., Гунар А.Ю., Гончаров А.А. Оценка возможностей применения свип-сигналов в морской буксируемой системе импульсной электроразведки на основе математического моделирования // Сейсмические приборы. 2024, Т. 60, № 4, с. 44-61. DOI 10.21455/si2024.4-3.
- 2) Алексеев Д.А., Кудинов Д.С., Потылицын В.С., Гончаров А.А. Модельный анализ эффективности псевдослучайных кодовых последовательностей для возбуждения поля упругих колебаний в системах вибрационной сейсморазведки // Вестник Российской Академии Естественных Наук, 2023, Т. 23, № 4, с.139-151, DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-4-139-151.
- 3) Ампилов, Ю. П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа: монография / Ю. П. Ампилов. – М. : Спектр, 2008. – 384 с. – ISBN 978-5-903930-01-2.
- 4) Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка : учеб. для вузов. – Тверь : Изд-во АИС, 2006. – 744 с.
- 5) Бобровский В.В. Особенности корреляционной обработки шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре // Геофизические исследования. 2022. Т. 23. № 2. С. 39-54. DOI: 10.21455/gr2022.2-3
- 6) Великин А. Б., Великин А. А. Новый корреляционный метод импульсной электроразведки с шумоподобными сигналами СТЕМ // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 2. – С. 47–54.
- 7) Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.
- 8) Гончаров А. А., Алексеев Д. А., Кошурников А. В. и др. Применение псевдослучайных кодовых последовательностей для повышения эффективности зондирования становлением поля в ближней зоне на Арктическом шельфе // Физика Земли. – 2022. – № 5. – С. 158–170.
- 9) Егоров И.В., Пальшин Н.А. Возбуждение электрокинетических эффектов на дне мелководья поверхностными волнами // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 461–469.
- 10) Жданов М.С. Теория обратных задач и регуляризации в геофизике. М.: Научный мир, 2007. 712 с.
- 11) Ильичев П.В., Бобровский В.В. Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 2. С.5–19.
- 12) Ипатов, В. П. Периодические дискретные сигналы с оптимальными корреляционными свойствами / В. П. Ипатов. – М. : Радио и связь, 1992. – 240 с.
- 13) Кауфман А.А., Алексеев Д.А., Орystalь М. Принципы электромагнитных методов наземной геофизики. Тверь: Международная Ассоциация “АИС”, 2016. 558 с.
- 14) Кошурников А.В. Основы комплексного геокриолого-геофизического анализа для исследования многолетнемерзлых пород и газогидратов на Арктическом шельфе России // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2020. No 3. С. 116–125.
- 15) Кошурников А.В., Алексеев Д.А., Пушкарев П.Ю., Гунар А.Ю., Балихин Е.И. Теоретический анализ применения шумоподобных сигналов в морской импульсной электроразведке // Вестник Моск. ун-та. Серия 4: Геология. 2024. Т. 63, № 2. С.108–118. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-108-118>
- 16) Крылов А.А., Ананьев Р.А., Черных D.V., и др. Комплекс морских геофизических методов для изучения процессов газовой выделености на Арктическом шельфе // Sensors. 2023. No. 23. P. 3872.
- 17) Кузин А. В., Торхов В. С. Учет техногенных помех при геофизических малоуглубинных работах // Горный информационно-аналитический бюллетень (ГИАБ). – 2023. – № 12-1. – С. 70–81. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_121\_0\_70.

- 18) Никифорова Н. С., Коннов А. В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // *Construction and Geotechnics*. – 2021. – Т. 12. № 3. – С. 14–24.
- 19) Светов Б.С. Основы геоэлектрики М.: ЛКИ, 2008, 656 с.
- 20) Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В. и др. Применение шумоподобных сигналов в зондированиях становлением поля // *Геофизика*. 2012. No 1. С. 52–60.
- 21) Фазылов В.Р., Шульгина О.Н., Щербакова Н.К. Использование MATLAB для решения некорректных задач. Казань: Из-во КГУ, 2010. 82 с.
- 22) Фрумин, Л. Л., Об одном подходе к решению нелинейных параметрических задач // *Журнал вычислительной техники*. – 2002. – № 5. – С. 45–50.
- 23) Хасан Р.Е., Кострыгин Ю.П. Исследование возможности и целесообразности применения псевдослучайных кодовых функций при кодоимпульсном накоплении колебаний для решения задач нефтегазовой сейсморазведки // *Геофизические технологии*. 2018. 1. С. 39–50. DOI:10.18303/2619-1563-2018-1-4.
- 24) Хмелевская В.К. Геофизические методы исследования земной коры. – М.: Наука, 1984. – 250 с.
- 25) Шахова Н., Семилетов И., Густафссон Ö. Выброс метана с Восточно-Сибирского арктического шельфа и его связь с оттаиванием многолетнемерзлых пород // *Nature Geoscience*. – 2017. – Vol. 10, No. 11. – P. 790–795.
- 26) Шнеерсон М.Б., Потапов О.А., Гродзенски В.А., Иноземцев А.Н., Лев И.С., Жуков А.П. Вибрационная сейсморазведка / Под ред. М.Б. Шнеерсона. М.: Недра. 1990. 240 с.
- 27) Юдин В.И., Останков А.В. Электромагнитные поля и волны. Часть 1. Волны в безграничных и полубесконечных средах: учебное пособие / Под общ. ред. В.И. Юдина. — Воронеж: Международный институт компьютерных технологий, 2007. — 182 с.
- 28) Alekseev D.A., Koshurnikov A.V., Gunar A.Yu., Balikhin E.I., Semiletov I.P., Shakhova N.E., Palshin N.A., Lobkovsky L.I. Time-domain electromagnetics for subsea permafrost mapping in the Arctic: The synthetic response analyses and uncertainty estimates from numerical modelling data // *Geosciences*. 2023. V. 13, Iss. 5. Art. 144. 20 p. <https://doi.org/10.3390/geosciences13050144>.
- 29) Barbier, M.G., Bondon, P., Mellinger, R., Viallix, J.R., 1976, Mini-SOSIE for land seismology: *Geophysical Prospecting*, 24, 518-527.
- 30) Crook T.N., Ball J.D. and Hubbard C.L. 1966. Method and apparatus for continuous wave seismic prospecting. US Patent Number 3,264,606.
- 31) Dean T. The use of pseudorandom sweeps for vibroseis surveys // *Geophysical Prospecting*. 2014. N62. P. 50–74. DOI: 10.1111/1365-2478.12074.
- 32) Giannino F., Leucci G. Noise reduction in transient electromagnetic data by stacking techniques // *Journal of Applied Geophysics*. – 2021. – Vol. 188. – Article ID: 104329. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104329.
- 33) Gu C. Smoothing noisy data via regularization: statistical perspectives // *Inverse Problems*. – 2008. – Vol. 24. – No. 3. – P. 034002. – DOI: 10.1088/0266-5611/24/3/034002.
- 34) Helwing C. Application of pseudo-random signal processing in geophysical exploration // *Geophysical Prospecting*. – 1999. – Vol. 47, No. 2. – P. 245–259.
- 35) James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R. – New York: Springer, 2013. – 426 p – (Springer Texts in Statistics). – ISBN 978-1-4614-7137-0. – DOI: 10.1007/978-1-4614-7138-7.
- 36) Key K. 1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: Methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers // *Geophysics*. 2009. V. 74, Iss. 2. P.F9–F20. <https://doi.org/10.1190/1.3058434>;
- 37) Krylov A.A., Ananiev R.A., Chernykh D.V., Alekseev D.A., Balikhin E.I., Dmitrevsky N.N., Novikov M.A., Radiuk E.A., Domaniuk, A.V., Kovachev, S.A., Timashkevich G.K., Ivanov V.N., Ilinsky D.A., Ganzha O.Yu., Gunar A.Yu., Pushkarev P.Yu., Koshurnikov A.V., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. A complex of marine geophysical methods for studying gas

- emission process on the Arctic Shelf // *Sensors*. 2023. V. 23, Iss. 8. Art. 3872. 24 p. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/8/3872>.
- 38) Li, H., Zhang, Y., Wang, X., & Chen, Z. (2023). New regularization techniques for ill-conditioning problems and their applications. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 122, 105749.
  - 39) Louboutin, M., Lange, M., Luporini, F., Kukreja, N., Witte, P. A., Herrmann, F. J., Velesko, P., & Gorman, G. J. Devito (v3.1.0): an embedded domain-specific language for finite differences and geophysical exploration // *Geoscientific Model Development*. – 2019. – T. 12, № 3. – C. 1165–1187.
  - 40) Nabighian, M. N., McNeill, J. C. Time-domain electromagnetic methods / in: Nabighian, M. N. (Ed.). *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists (SEG), 1991. Vol. 2, No. 3, pp. 427–520.
  - 41) Scholtz P. Optimum pseudo-random sweeps for vibratory surveys to reduce risk of damaging buildings. SEG Las Vegas Annual Meeting. 2012. DOI: 10.1190/segam2012-0623.1.
  - 42) Scholtz P. Pseudo-random sweeps for built-up area seismic surveys // *The Leading edge*. 2013. №32. Vol. 3. P. 276–282. DOI: 10.1190/tle32030276.1
  - 43) She X. Design and realization of pseudo random seismic sweeping signal in vibroseis. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. 2011. P. 5217–5219. DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057642.
  - 44) Strong S. Hearn S. Numerical modelling of pseudo-random land seismic sources. ASEG Extended Abstracts. 2004. N1. P. 1–4. DOI: 10.1071/ASEG2004-ab142
  - 45) Sun F., Wang Z.-R., Chen Z.-B., Fan D.-D. Pseudorandom sweeping and system testing for seismic vibrator. *Guangxue Jingmi Gongcheng // Optics and Precision Engineering*. 2009. N17. P. 2569–2575.
  - 46) Svetov B.S., Alekseev D.A., Yakovlev A.G. On implementation of noise-like signals in time-domain EM imaging. *Geobaikal 2012 - 2nd International Research and Application Conference on Electromagnetic Research Methods and Integrated Geophysical Data Interpretation*. 2012. P. S4.
  - 47) Vedanti N., Gupta L., Singh V., Vadapalli U., Babu Naik R.T., Vasudevan G., Kishore P. Problems with the standard vibroseis deconvolution: some practical solutions, *Exploration Geophysics*. 2020. DOI: 10.1080/08123985.2020.1825913.
  - 48) Wischmeyer C.R. Method and apparatus for continuous wave seismic prospecting: USA Patent US3264606A. Publication date: 02.08.1966.
  - 49) Zepernick H. J., Finger A. *Pseudo Random Signal Processing: Theory and Applications*. – Chichester: Wiley, 2005. – 320 p.