

на правах рукописи



Бобровский Владимир Владимирович

**ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС С
ШУМОПОДОБНЫМИ СИГНАЛАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

Специальность 1.6.9.
«Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в лаборатории перспективных аппаратурных разработок Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке» (НС РАН).

Научный руководитель:	Александров Павел Николаевич доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Центра геоэлектромагнитных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.
Официальные оппоненты:	Каршаков Евгений Владимирович Доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией №1 «Динамических информационно-управляющих систем им. Б. Н. Петрова», Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Пушкарев Павел Юрьевич Доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры геофизических методов исследования земной коры геологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита диссертации состоится **12 февраля 2026 года в 14:00** на заседании диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН, а также на официальном сайте института: <http://www.ifz.ru>. Автореферат размещён на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации: <http://vak.gisnauka.ru/>.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, необходимо направлять в одном экземпляре по адресу: 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, учёному секретарю диссертационного совета, кандидату физико-математических наук Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан «___» декабря 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного совета _____ /Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из основных инструментов при изучении современных геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах, являются активные электроразведочные методы с контролируемым источником, обеспечивающие высокую точность измерения контролируемых электрических параметров исследуемой среды (Земной коры). В частности, электроразведочные методы широко используются в задачах мониторинга геодинамических процессов в районах расположения объектов атомной отрасли [Шайторов и др., 2022] и нефтегазовой инфраструктуры [Копылов, Садуртдинов, 2019]. В работе Б.С. Светова [Светов, 1992] подробно рассмотрены физические предпосылки и способы практической реализации активной и пассивной модификаций электромагнитного мониторинга сейсмотектонических (в более общем смысле - геодинамических) процессов, происходящих в недрах Земли. В данной работе сделан акцент на использование электромагнитного мониторинга (в комплексе с режимными наблюдениями полей иной природы) в качестве основы для прогноза землетрясений. Одной из практических реализаций подобных исследований является система комплексного электромагнитного мониторинга геодинамических процессов на территории Северного Тянь-Шаня [Баталева, Мухамадеева, 2018], основанная на методе становления поля в дальней зоне (ЗСД) и действующая на протяжении более 30 лет.

Для повышения точности измерения электрических параметров Земной коры (кажущееся сопротивление) использовалась идея применения для электромагнитного зондирования земной коры шумоподобных зондирующих сигналов, обладающих уникальными статистическими свойствами и в первую очередь так называемой большой «информационной избыточностью». Корреляционная обработка сигналов, регистрируемых на приемной стороне электроразведочной измерительной системы на фоне значительных шумов и помех различного происхождения при зондировании шумоподобными токовыми импульсами, может обеспечить многократное повышение соотношения сигнал-шум. Это позволяет резко снизить шумовой порог чувствительности измерительной системы и в конечном итоге обеспечит расширение диапазона исследуемых глубин земной коры при значительном снижении энергопотребления зондирующих генераторных установок.

Степень разработанности темы исследования. Шумоподобные псевдослучайные сигналы давно и успешно применяются в системах радиосвязи [Диксон, 1979] спутниковой навигации [Насыров, 2005] и передачи информации [Шумоподобные..., 1973]. Идея применения шумоподобных сигналов (ШПС) в геофизических исследованиях земной коры возникла в начале 1970-х годов. Одной из первых успешных попыток применения шумоподобных сигналов в активной электроразведке является работа канадских специалистов [Duncan et al., 1980]. Данная работа послужила прототипом при разработке отечественными специалистами электроразведочной аппаратуры с применением ШПС [Великин,

2009]. А.Б. Великиным с коллегами был предложен новый корреляционный метод электроразведки с применением специальных шумоподобных сигналов СТЕМ и экспериментальный образец программно-аппаратурного комплекса СТЕМ-1 [Великин, Великин, 2016], основной задачей которого является поиск и обнаружение в земной коре полезных ископаемых, в частности углеводородного сырья, на глубинах до 4000 м. Результаты успешного полевого опробования данного комплекса для поисков углеводородного сырья на типичном платформенном разрезе в Калужской области, а также в двух районах Восточной Сибири в 2012-2014 гг. описаны в работе [Великин и др., 2016].

Из теоретических работ следует отметить работу Б.С. Светова с коллегами [Светов и др., 2012] посвященную применению ШПС в геоэлектрике. В работе теоретически доказано преимущество использования псевдослучайных зондирующих последовательностей, по сравнению с традиционными методами зондирования детерминированными последовательностями импульсов с фиксированными длительностью и периодом повторения. Данная работа получила продолжение. В работах [Гончаров и др., 2022; Алексеев и др., 2023; Алексеев и др., 2024] дается теоретическая оценка возможности использования шумоподобных сигналов в морской буксируемой системе импульсной электроразведки и в системах вибрационной сейсморазведки. Интерес в данных работах вызывает использование для моделирования реальных шумов и помех, записанных классической электроразведочной аппаратурой в реальных полевых условиях.

Объект исследования. Объектом исследования является система геофизического мониторинга геодинамических процессов, происходящих в Земной коре. Способом осуществления такого мониторинга является активное зондирование Земной коры с помощью электромагнитных импульсов, возбуждаемых в ней специальными генераторными установками. На исследуемой территории создается сеть измерительных пунктов, в которых осуществляется регистрация сигналов отклика Земной коры на электромагнитное воздействие и их обработка с помощью специального программного обеспечения. В результате такой обработки строятся временные ряды изменения удельного электрического сопротивления горных пород на разных глубинах, отражающие изменения напряженно-деформированного состояния Земной коры.

Цель исследования. Создание новой аппаратуры, обеспечивающей повышенное качество и эффективность измерения электрических параметров Земной коры методом становления поля, за счет использования шумоподобных зондирующих сигналов и последующей корреляционной обработки сигналов отклика среды на такое воздействие.

Задачи исследования:

1. Разработать математическую модель электроразведочной системы с шумоподобными зондирующими сигналами. При помощи разработанной модели теоретически обосновать возможность применения и преимущество использования шумоподобных зондирующих сигналов в сравнении с традиционной системой,

использующей для зондирования биполярные импульсные последовательности с постоянной длительностью импульсов.

2. Исследовать особенности применения шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре. Выявить предполагаемые источники структурных помех в электроразведочной аппаратуре с шумоподобными зондирующими сигналами с целью оценки их влияния на качество получаемой кривой становления поля и разработать способ их устранения.

3. Разработать, изготовить и протестировать в полевых условиях экспериментальный образец аппаратно-программного широкополосного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами для измерения электрических параметров земной коры методом становления поля в ближней зоне.

4. Выполнить отработку технологии зондирования Земной коры с использованием экспериментального образца широкополосного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами, включающую в себя:

- Разработку методики проведения измерений в реальных полевых условиях;
- Предварительную оценку погрешности измерения кривой становления поля;
- Разработку методики получения геоэлектрических характеристик среды.

Методология и методы исследования. Предметом исследования в данной работе является обоснование теоретической возможности и преимуществ применения шумоподобных сигналов при создании систем геофизического мониторинга с применением активных методов электроразведки с контролируемым источником. Для решения данной задачи применялся широкий круг методов вычислительной математики – численные методы, методы математической статистики, спектральный анализ и т.д., объединяемых общим понятием методов цифровой обработки сигналов. В процессе решения задачи большое внимание уделялось тем особенностям применения шумоподобных сигналов, которые могут повлиять на точность, стабильность и качество получаемых результатов при практической реализации идеи применения шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре.

Для практической проверки результатов моделирования был разработан экспериментальный образец аппаратно-программного электроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами (ЭРК ШПС), работающий по методу ЗСБ. При проектировании программного обеспечения использовались языки программирования Assembler, Pascal (Delphi), C и C++. Для отработки и тестирования некоторых алгоритмов применялись методы математического моделирования, реализованные в средах MATLAB и Mathcad. Для оценки погрешности измерений применялись стандартные методики, используемые при разработке измерительной аппаратуры и сопутствующего программного обеспечения.

Научная новизна полученных результатов:

1. На математических моделях электроразведочной системы с шумоподобными зондирующими сигналами доказана возможность и подтверждено

теоретическое преимущество их применения, заключающееся в более эффективном подавлении шумов по сравнению с обычной системой, использующей для зондирования биполярные импульсные последовательности с постоянной длительностью импульсов.

2. Впервые исследованы особенности применения шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре. Выделены предполагаемые источники структурных помех в электроразведочной аппаратуре с шумоподобными зондирующими сигналами.

3. Разработан алгоритм, обеспечивающий с высокой вероятностью правильного обнаружения и малой вероятностью ложной тревоги, обнаружение и дальнейшее устранение на получаемой кривой становления поля структурных помех. Предложен критерий автоматического выбора порога обнаружения структурных помех, который позволяет максимально автоматизировать процесс обработки данных и повысить ее скорость при выполнении работ в полевых условиях.

4. Разработан и изготовлен экспериментальный образец аппаратурно-программного измерительного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами обеспечивающий контроль кривой становления поля благодаря широкому частотному диапазону и большому динамическому диапазону регистрируемых сигналов.

5. Получены первые оценки качества кривых зондирования на разных временах становления поля. На основании результатов полевых экспериментов в первом приближении получилось, что относительная погрешность измерения сигналов становления поля не превышает 3% на интервале 1,5 с – 2 с, 1% на интервале 0,5 с – 1,5 с и 0,2 % на временах меньше 0,5 с.

6. Разработана методика получения геоэлектрических характеристик среды в экспериментальном электроразведочном комплексе с шумоподобными сигналами. При помощи данной методики для ряда пунктов наблюдения на территории Бишкекского геодинимического полигона, получены кривые кажущегося удельного сопротивления - $\rho_{\tau}(t)$, кажущейся продольной проводимости - $S_{\tau}(t)$ и кажущейся глубины - $h_{\tau}(t)$. Построены временные ряды вариаций кажущегося удельного сопротивления среды.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Теоретическая значимость настоящего исследования заключается в систематизации и развитии научных представлений об особенностях применения шумоподобных сигналов в активной электроразведке. Теоретические исследования, выполненные на математических моделях, использованы при разработке и практической реализации экспериментального образца аппаратурно-программного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами. Разработанная методика обнаружения и дальнейшего устранения структурных помех позволяет преодолеть ограничения накладываемое использованием элементов с нелинейными свойствами при конструировании аппаратуры с применением шумоподобных сигналов.

Практическая значимость заключается в создании экспериментального аппаратурно-программного электроразведочного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами. Его апробация в условиях полевого эксперимента подтвердила, полученную теоретически, эффективность применения шумоподобных сигналов в активной электроразведке. Предварительные результаты испытаний комплекса создают основу для его использования, в составе действующей на территории Бишкекского геодинамического полигона, системы активного электромагнитного мониторинга земной коры.

Разработанное программное обеспечение служит для предварительного изучения и моделирования элементов аппаратуры и методов обработки данных, применяемых при разработке аппаратуры и программного обеспечения активной электроразведки методом становления поля. Данное программное обеспечение внедрено и активно используется при разработке новой аппаратуры и программного обеспечения в лаборатории перспективных аппаратурных разработок Научной станции РАН в г. Бишкеке.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электроразведочной системы с шумоподобными зондирующими сигналами, основанная на передаточных характеристиках аппаратуры и представлении отклика геосреды на зондирующее воздействие в виде интегрирующего инерционного звена первого порядка.

2. Способ автоматического обнаружения и устранения структурных помех, возникающих на кривой становления поля в результате корреляционной обработки непрерывного сигнала отклика среды на шумоподобное зондирующее воздействие, и источники их появления.

3. Экспериментальный образец аппаратурно-программного электроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами, для эффективного применения в методе становления поля.

Личный вклад соискателя. Разработка математической модели электроразведочной системы с шумоподобными сигналами была выполнена в соавторстве с Ильичевым П.В. где автор отвечал за разработку и тестирование алгоритмов и написание программного обеспечения для их реализации, а также принимал непосредственное участие в обработке и описании результатов экспериментов. Работы по исследованию особенностей применения шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре и, в частности, выделение источников структурных помех была выполнена автором лично в соавторстве с Ильичевым П.В. Разработка алгоритма и программного обеспечения для обнаружения и устранения структурных помех на кривой становления поля была выполнена автором лично. Разработка экспериментального образца аппаратурно-программного измерительного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами была выполнена силами лаборатории перспективных аппаратурных разработок (ЛПАР) НС РАН под руководством Ильичева П.В. и при активном участии м.н.с. ЛПАР

Лашина О.А. Вклад автора в данную работу заключался в разработке всего программного обеспечения комплекса. Также автор осуществлял руководство и принимал непосредственное участие в разработке цифровой части аппаратного обеспечения измерительного комплекса. Автор принимал личное участие в подготовке и проведении комплексного полевого эксперимента по оценке качества получаемых кривых зондирования. Разработка методики получения геоэлектрических характеристик среды в экспериментальном электроразведочном комплексе с шумоподобными сигналами осуществлялась под руководством и при личном участии автора. Большой вклад в реализацию данной части работы внесли инженер-программист ЛПАР Авдюхов Д.М. и научный руководитель д. ф.-м. н. Александров П.Н.

Степень достоверности результатов. Способы получения научных результатов и сформулированные выводы и заключения основаны на применении инструментов математического моделирования с последующим практическим их подтверждением результатами лабораторных и полевых экспериментов с действующим образцом экспериментального аппаратно-программного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований, приведенные в диссертационной работе представлены и обсуждены на следующих конференциях и симпозиумах:

1. VI международный симпозиум. "Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов" (июнь 2014 г.), г. Бишкек;
2. VII международный симпозиум. "Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов" (июнь 2017 г.), г. Бишкек;
3. VIII международный симпозиум. "Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов" (июнь 2021 г.), г. Бишкек;
4. Одиннадцатые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. "Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле земли, интерпретация геофизических полей", г. Екатеринбург;
5. Семинар «Современные проблемы геофизики», проводимый Московским государственным университетом совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта;
6. Семинар «Геолого-геофизический мониторинг литосферы Тянь-Шаня», проводимого Научной станцией РАН в г. Бишкеке совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта;
7. V Международная научно-практическая конференция «Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2023» (октябрь 2023 г.) г. Москва.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Основные научные результаты, полученные в диссертации, отражены в 10-и печатных работах, из них: **5** – опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, Scopus, RSCI и рекомендованных ВАК РФ; **1** - опубликована в рецензируемом научном издании индексируемом

системой РИНЦ и системой SCOPUS; 4 - опубликованы в прочих рецензируемых научных изданиях входящих в РИНЦ. Также получены 5 свидетельств государственной патентной службы Российской Федерации о регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 82 наименований. Основное содержание представлено на 206 страницах, содержит 88 рисунков и 9 таблиц.

Благодарности. Особую благодарность автор выражает зав. лабораторией перспективных аппаратных разработок П.В. Ильичеву за разработку темы и помощь в работе над диссертацией. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю д.ф.-м.н. П. Н. Александрову и директору НС РАН д.ф.-м.н. А. К. Рыбину. Автор благодарен сотрудникам лаборатории перспективных аппаратных разработок НС РАН О.А. Лашину, М.О. Лисимову, В.И. Мельниченко, А.А. Печерову и Д.В. Коломейцеву за участие в разработке аппаратуры и проведении полевых работ. Автор выражает искреннюю признательность инженерам ЛПАР Е.В. Вихрову и Д.М. Авдюхову за помощь в реализации методики решения прямой и обратной задачи ЗСБ. Автор благодарит сотрудников НС РАН к.г.-м.н. Е.А. Баталеву и В.А. Мухамадееву за консультации и помощь при написании диссертации. Автор благодарит д.т.н. А.Б. Великина за ценные замечания и советы при обсуждении результатов данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Представлена актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены основные защищаемые положения, приводятся методы исследований, определена научная новизна, практическая и экономическая ценность работы, а также отмечены личный вклад соискателя, публикации, апробация результатов и кратко излагается структура диссертации.

Глава 1. Комплекс геофизических методов изучения строения и динамики земной коры для территории Бишкекского геодинамического полигона

Для развития фундаментальных основ прогноза и раннего предупреждения природных катастроф крайне важна задача комплексного подхода к анализу данных полученных различными методами наблюдений [Светов, 1992]. Для решения данной задачи актуально повышение качества данных и расширение комплекса методов геофизических исследований. Это может быть выполнено путем развития существующих и разработки новых методов, аппаратно-программных средств и основ технологий геофизических исследований.

Параграф 1.1. Режимные наблюдения на территории Бишкекского геодинамического полигона. Отличительной особенностью Бишкекского геодинамического полигона (БГП) является наличие комплекса регулярных режимных исследований, выполняемых на его территории различными методами, взаимно дополняющими друг друга. Одним из таких методов является метод ЗСД,

использующийся в системе активного электромагнитного мониторинга земной коры на территории БГП с начала 90 гг. прошлого века [Трапезников Ю.А. и др., 1997]. Одним из направлений совершенствования активных методов электроразведки на территории НС РАН является расширение ее возможностей за счет использования помимо ЗСД других методов активной электроразведки, в частности, метода зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Преимуществом метода ЗСБ по сравнению с ЗСД является то, что разнос между источником (индукционной зондирующей рамкой) и точкой наблюдения (датчиком сигнала) может быть значительно меньше исследуемой глубины [Сидоров В.А., 1985]. Благодаря повышенной разрешающей способности метода ЗСБ он применяется для более детального изучения структуры Земной коры.

Параграф 1.2. Среднестатистический разрез электрической структуры Земной коры территории БГП. В качестве модели для приближенной оценки необходимой чувствительности измерительной аппаратуры была выбрана модель зондируемой среды (Земной коры) в виде горизонтально слоистой структуры, каждый слой которой простирается до бесконечности в горизонтальном направлении и имеет свое удельное электрическое сопротивление и мощность (толщину). В качестве оценочного параметра определялась величина удельного электрического сопротивления эквивалентного однородного слоя, соответствующего среднестатистическому разрезу электрической структуры Земной коры, полученному по данным ранее проведенных зондирований Земной коры (методами ЧЗ и ЗСБ) в 22 –х точках на территории БГП. Согласно правилу эквивалентности можно записать выражение, связывающее параметры многослойной горизонтально слоистой среды с параметрами эквивалентного однородного слоя:

$$\rho_{\text{э}} = \frac{h_{\text{э}}}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}}. \quad (1)$$

Подставив данные полученного среднестатистического разреза, в формулу (1) получим среднестатистическое значение удельного электрического сопротивления эквивалентного однородного слоя Земной коры $\rho_{\text{эс}} = 204 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Параграф 1.3. Оценка уровней сигналов становления поля применительно к методу ЗСБ для обобщенного геоэлектрического разреза БГП. Для приближенной оценки динамики сигналов становления поля применительно к методу ЗСБ взята установка с соосными петлями. Согласно [Жданов, 1986] величина ЭДС в приемной рамке, расположенной на поверхности однородного полупространства с удельным электрическим сопротивлением ρ в ближней зоне индукционного источника, определяется выражением:

$$|\Delta U_{Bz}| = \frac{\mu_0 q Q I \left(\frac{\mu_0}{\rho} \right)^{\frac{3}{2}}}{10 \pi^{\frac{3}{2}} t^{\frac{5}{2}}}, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная (проницаемость) вакуума; q – площадь приемной рамки (эквивалентная площадь измерительной катушки датчика); Q –

площадь зондирующей рамки; I – амплитуда импульсов тока в зондирующей рамке; ρ – удельное электрическое сопротивление среды (земной коры); t – текущее время отсчитываемое от момента подачи скачка тока в зондирующую рамку.

Диапазон измеряемого (принимаемого) сигнала становления поля для контролируемых глубин определяется как отношение максимального и минимального значения ЭДС в приемной катушке датчика для времен становления поля соответствующих минимальной и максимальной глубинам зондирования. Для определения ЭДС согласно (2), необходимо знать величину удельного электрического сопротивления среды ρ и время регистрации становления поля t . Время регистрации становления поля, соответствующее заданной эффективной глубине зондирования – $z_{эф}$, можно записать следующим образом:

$$t \approx \left(\frac{z_{эф}}{0.71\sqrt{\rho}} \right). \quad (3)$$

Оценочные расчеты выполненные по формулам (2) и (3) показывают, что для диапазона глубин зондирования от 100 м до 10 км, с учетом среднего удельного электрического сопротивления эквивалентного однородного слоя (204 Ом.м), динамический диапазон регистрируемых сигналов должен быть не менее 200 дБ.

Глава 2. Теоретическое обоснование применения шумоподобных сигналов в электромагнитных зондированиях становлением поля

Параграф 2.1. Предпосылки применения шумоподобных сигналов в импульсной электроразведке. В основе применения ШПС в активных электромагнитных системах зондирования могут быть положены выражения, справедливые для линейных систем:

$$Y(t) = X(t) \otimes g(t) \quad (4)$$

$$R_{XY}(t) = R_{XX}(t) \otimes g(t), \quad (5)$$

где, знак \otimes обозначает свертку; $R_{XX}(t)$ – автокорреляционная функция (АКФ) входного шумоподобного сигнала $X(t)$; $g(t)$ – импульсная переходная характеристика (ИПХ) системы (земной коры); $R_{XY}(t)$ – взаимная корреляционная функция (ВКФ) между входным (зондирующим) $X(t)$ и принимаемым $Y(t)$ сигналами.

Проходя через геологическую среду, каждый импульс генерируемой дискретной ШПС-последовательности $X(t)$ подвергается свертке с импульсной переходной характеристикой среды $g(t)$, которая отражает электрофизические свойства пород (удельное сопротивление, поляризуемость, диэлектрическую проницаемость). В результате в пункте наблюдения образуется последовательность измеренных импульсов $Y(t)$. Наша задача – найти ИПХ системы, распределенную в импульсах последовательности $Y(t)$.

При правильном выборе ШПС $X(t)$ можно добиться того, что $R_{XX}(t)$ будет приближаться к $\delta(t)$ – дельта функции Дирака. В этом случае согласно (5) можно рассчитывать, что ВКФ - $R_{XY}(t)$ на выходе корреляционного приемника будет приближаться к искомой ИПХ геосреды [Ильичев, Бобровский, 2014]. При этом важно отметить, что вычисляемая в дискретном виде ВКФ близка не к истинной

ИПХ (реакции на дельта-импульс), а к переходной характеристике Земли на короткий импульс длительностью порядка шага дискретизации и с единичной площадью. В поздней стадии ИПХ форма и длительность импульса не играет роли. В качестве ШПС были выбраны бинарные М-последовательности (псевдослучайные последовательности максимальной длины - МП), представляющие собой последовательности биполярных импульсов прямоугольной формы. АКФ одиночной МП помимо основного (главного) лепестка имеет побочные боковые выбросы (рис. 2.1 слева внизу). Эти выбросы ограничивают применение корреляционной обработки одиночных МП в импульсной электроразведке. Однако периодически повторяющиеся МП не имеют боковых выбросов на АКФ и ВКФ (рис. 2.1 справа внизу). Их АКФ по форме приближается к δ -функции Дирака.

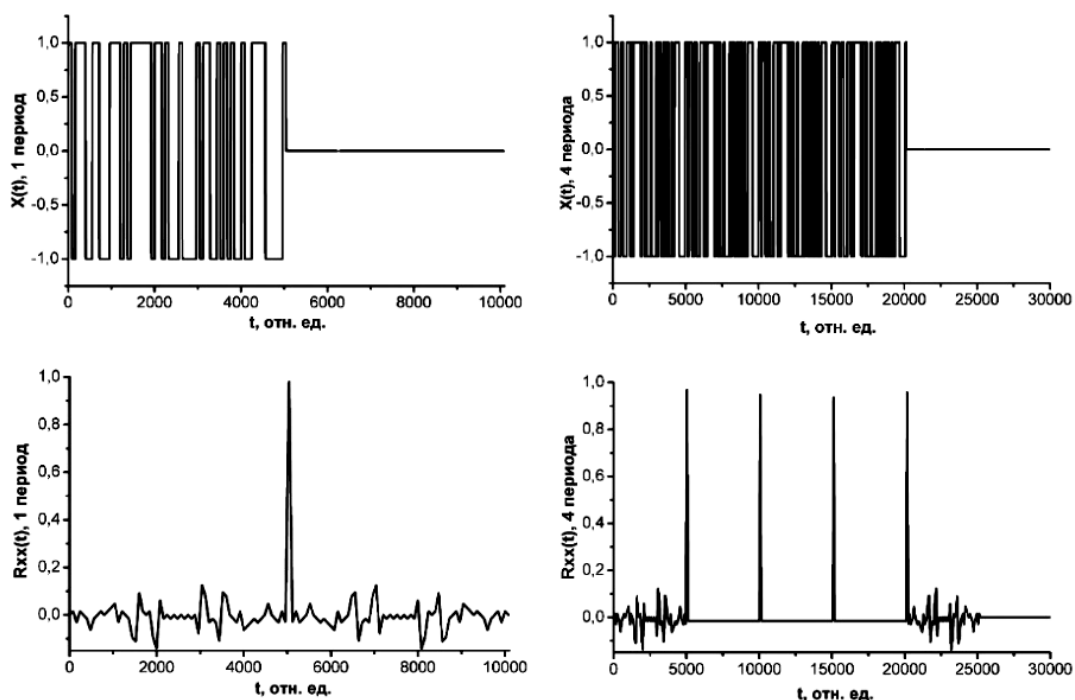


Рисунок 2.1 – Изменение формы АКФ шумоподобных сигналов при периодическом их повторении.

При этом после корреляционной обработки возможно дальнейшее накопление периодических сигналов ВКФ за исключением сигналов от первой и последней М-последовательностей, что обеспечивает дополнительное увеличение отношения сигнал-шум на приемной стороне.

Параграф 2.2. Математическая модель электроразведочной системы с шумоподобными зондирующими сигналами. В рамках исследования проведено математическое моделирование электроразведочной системы с применением ШПС и традиционной электроразведочной системы, в которой для зондирования становления поля используются биполярные импульсные последовательности с постоянной длительностью импульсов. Основные задачи моделирования:

1) Исследовать близость ВКФ к ИПХ среды при использовании ШПС.

2) Оценить шумоподавление при возбуждении и корреляционной обработке шумоподобных сигналов по сравнению с традиционными методами генерации и обработки сигналов в системах активного электромагнитного зондирования земной коры.

Структура разработанной модели состоит из двух синхронно работающих каналов: канала с генерацией и корреляционной обработкой ШПС и канала с генерацией детерминированной последовательности зондирующих импульсов и последующим их накоплением. В структуру математической модели также были включены модели различного рода помех и шумов характерных для исследований, проводимых на территории Северного Тянь-Шаня. Модель среды, представлена в виде интегрирующего инерционного звена первого порядка с фиксированными (задаваемыми) параметрами такими как коэффициент передачи и постоянная времени. Для снижения собственной численным методам погрешности вычислений, определяемой нелинейным преобразованием сигнала, необходимо получить аналитическое выражение модели отклика среды. Так как импульсы М-последовательности имеют различную длительность, то сигнал отклика среды можно представить в виде последовательности откликов интегрирующего инерционного звена на подачу каждого последующего импульса, при начальных условиях определяемых значениями сигнала, вычисленного к концу предыдущего импульса:

$$U_{Oci}(t) = U_{Ci} + [(-1)^i \cdot A_{ШПС} - U_{Ci}] \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{CP}}}),$$

где: $A_{ШПС}$ – амплитуда импульсов в зондирующей М-последовательности; i – порядковый номер импульса в зондирующей последовательности; U_{Ci} – уровень сигнала на выходе интегрирующего инерционного звена в момент начала импульса с номером i ; t – текущее время, отсчитываемое внутри импульса; τ_{cp} – постоянная времени модели среды (интегрирующего инерционного звена).

Параграф 2.3. Результаты моделирования. Оценка близости ВКФ к ИПХ среды была выполнена для моделей среды, приближенно имитирующих однородное полупространство (одно интегрирующее инерционное звено) и горизонтально слоистую среду (четыре параллельно включенных интегрирующих инерционных звена первого порядка, сигналы от которых поступают на общий сумматор). Переходная характеристика такой модели определяется аналитическим выражением:

$$h(t) = \sum_{i=1}^4 A_i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right) = 1 - \sum_{i=1}^4 A_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}}; \quad \sum_{i=1}^4 A_i = 1$$

где A_i – амплитуды экспоненциальных составляющих модели $h(t)$, τ_i – постоянные времени экспоненциальных составляющих модели $h(t)$. Амплитуды (A_i) и постоянные времени (τ_i) экспоненциальных составляющих модельного сигнала становления поля, подбирались. Исходными данными для подбора был задаваемый динамический диапазон регистрируемых сигналов (не менее 140 дБ) и постоянная времени $\tau_l \approx 4,0$ мкс для сигнала «прямого поля», представляющего собой э.д.с.

наводимую в витках измерительной катушки датчика за счет прямой индуктивной связи через воздух между зондирующей рамкой и измерительной катушкой датчика. Результат сравнения ИПХ среды по ВКФ для вышеуказанных моделей показал, что вычисляемая дискретно ВКФ близка к ИПХ начиная со времен больших длительности минимального импульса МП. Пример сравнения приведен на рис. 2.2.

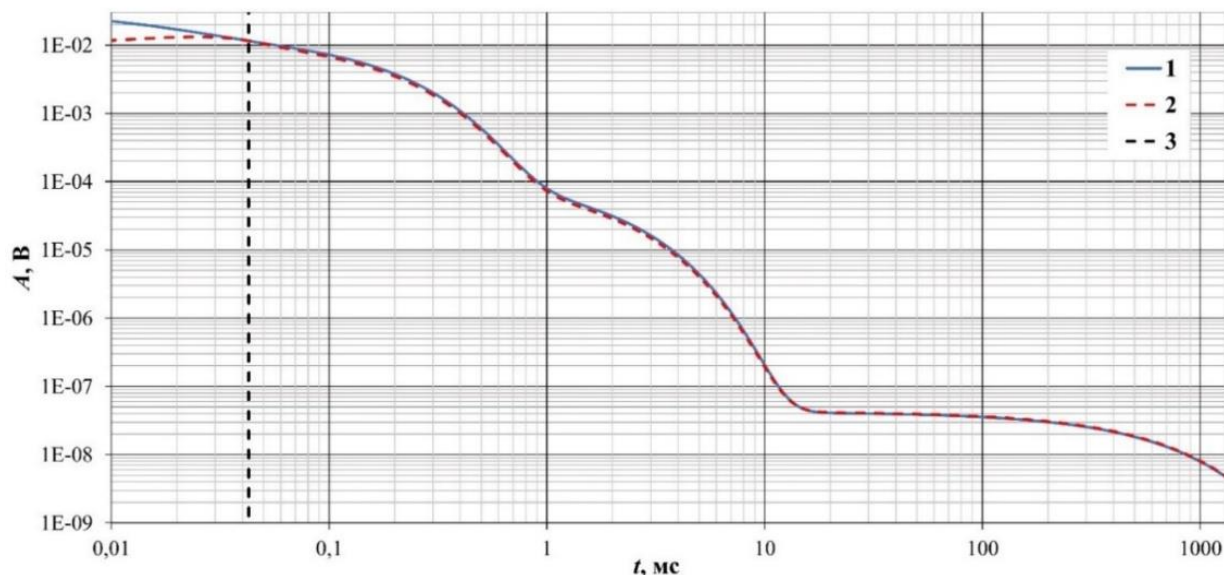


Рисунок 2.2 – Графики ИПХ и ВКФ выполненные в билингарифмическом масштабе для ИПХ, представленной в виде суммы четырех интегрирующих инерционных звеньев первого порядка с разными постоянными времени 1 – график ИПХ; 2 – график ВКФ; 3 – линия отметки длительности минимального импульса М-последовательности.

Для оценки эффективности подавления шума при использовании ШПС в сравнении со стандартными методами накопления сигналов рассматривался шум с нормальным законом распределения, частотный спектр которого ограничивался полосой пропускания измерительного канала. Для обеспечения фиксированной энергии зондирующих сигналов в каналах модели обеспечивалось примерное постоянство длительности МП и импульсов ПП. На рис. 2.3 приведены зависимости коэффициента подавления шумов в корреляционном канале обработки КПК и выигрыша в подавлении шумов РГ в этом канале по отношению к типовому.

На основании рис. 2.3 можно констатировать, что при прочих равных условиях (равенство энергий зондирующих сигналов) возможно достижение значительного выигрыша (десятки и более раз) в подавлении шума, получаемого на выходе системы с ШПС по сравнению с типовыми системами даже при незначительных длинах М-последовательностей. Таким образом данная глава раскрывает первое защищаемое положение: *Математическая модель электроразведочной системы с шумоподобными зондирующими сигналами, основанная на передаточных характеристиках аппаратуры и представлении отклика геосреды на зондирующее воздействие в виде интегрирующего инерционного звена первого порядка.*

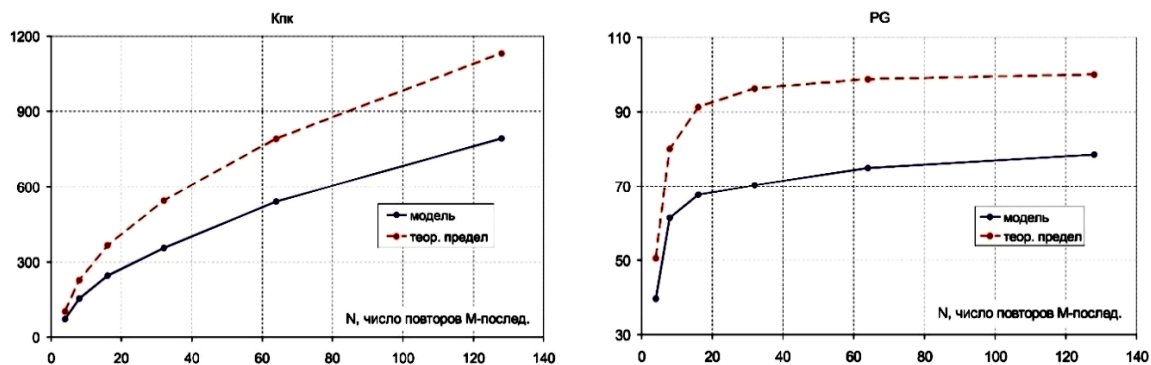


Рисунок 2.3 – Зависимости коэффициента подавления шумов в корреляционном канале $K_{ПК}$ и выигрыша в подавлении шумов в корреляционном канале (в размах) в сравнении с типовым PG от числа повторов М-последовательностей длиной 1023 при длительности такта 10 (красный пунктир – теоретические зависимости).

Глава 3. Особенности применения шумоподобных сигналов в импульсной электроразведке

В процессе проведения экспериментальных работ с макетным образцом ЭРК ШПС при получении кривых становления поля в области больших времен проявляются структурные помехи в виде коротких импульсов (рис. 3.1).

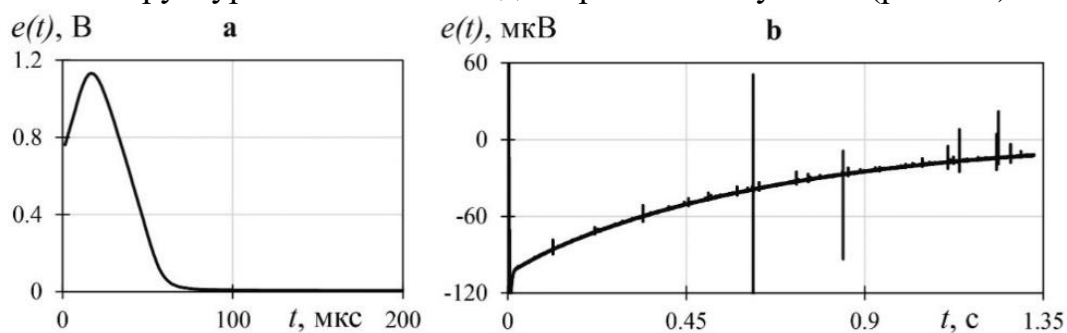


Рисунок 3.1 – Кривая становления поля, полученная на экспериментальной точке «Чункурчак»: а - на малых и б - на больших временах

Их форма и временное положение на кривой становления связаны с параметрами и структурой зондирующих шумоподобных сигналов. На больших временах становления поля амплитуда импульсов структурных помех становится соизмеримой с уровнем сигнала становления поля и даже может значительно превышать его (рис. 3.1б). С помощью известных стандартных процедур цифровой обработки сигналов невозможно подавить эти помехи без искажения формы полезного сигнала становления поля. На специально разработанных математических моделях были исследованы предполагаемые физические источники структурных помех (параграфы 3.1 – 3.3).

Параграф 3.1. Дискретизация сигналов как источник структурных помех ШПС. Уровень структурных помех, возникающих при дискретизации сигналов, стабилен и зависит лишь от разрядности применяемого АЦП. Численно уровень структурных помех, вызванных дискретизацией сигнала примерно на порядок меньше веса младшего разряда (дискреты) АЦП, а снижение их уровня достигается увеличением разрядности АЦП в измерительном канале ЭРК ШПС.

Параграф 3.2. Исследование на математических моделях нелинейностей измерительного тракта как причины появления структурных помех ШПС.

Для моделирования нелинейности измерительного тракта в математическую модель измерительного комплекса ЭРК ШПС было введено нелинейное звено, представляющее собой устройство (блок), для которого зависимость выходного сигнала от входного (передаточная характеристика) представляет собой функцию отличную от линейной (степенная, логарифмическая и т.д.). Рассматриваемые при проведении лабораторных экспериментов с ЭРК ШПС, характерные для аналоговых схем нелинейности типа «зона нечувствительности», «зона ограничения», а также интегральная нелинейность АЦП относятся к статическим нелинейностям. Проведенные исследования показали, что любые статические нелинейности в измерительном тракте являются причиной появления структурных помех. Выявлена функциональная (близкая к линейной) связь между амплитудой структурных помех и амплитудой измеряемого сигнала. Из этого следует что, вариации любой точки графика импульсной переходной характеристики земли, при стабильных параметрах измерительной аппаратуры, зависят только от изменения параметров исследуемого источника (Земли).

Параграф 3.3. Моделирование проникающих в измерительный тракт цифровых сигналов, как источника появления структурных помех. С целью оценки влияния помех, возникающих в измерительном тракте ЭРК ШПС от работы цифровых схем на появляющиеся после корреляционной обработки сигналов структурные помехи, была разработана модель, представляющая проникающие цифровые помехи как результат прохождения управляющих цифровых сигналов формирователя М-последовательности через паразитную дифференцирующую RC-цепь. Цифровой сигнал представлен в виде импульсов трапецеидальной формы, имеющих разные по длительности фронт и спад. Результаты моделирования показали, что проникающие в измерительный тракт цифровые сигналы являются одной из причин появления структурных помех. При этом уровень структурных помех тем больше, чем больше разница между длительностями фронта и спада цифровых сигналов и увеличивается с ростом постоянной времени паразитной RC-цепи.

Параграф 3.4. Метод уменьшения уровня структурных помех на кривой становления поля. Для уменьшения уровня структурных помех был разработан способ их обнаружения и дальнейшего устранения на кривой становления поля. Способ заключается в поиске превышения энергии сигнала, вычисляемой в скользящем окне фиксированной длительности, заданного порога. При этом обеспечивается высокая вероятность (более 0,9) правильного обнаружения импульсных сигналов на фоне широкополосных шумов даже при малом соотношении сигнал-шум близком к единице. Обнаружение структурных помех выполняется в разностной кривой, получаемой вычитанием из кривой становления поля ее медленно меняющейся (низкочастотной) составляющей. Структурные помехи остаются на прежних местах и обнаружение их можно выполнить при

постоянном (фиксированном) пороге для всей кривой становления поля. В качестве численного критерия при определении порога вычислялся коэффициент корреляции Пирсона ($r_{f_H f}$) между вычисленным распределением плотности вероятности и функцией нормального закона распределения для сигнала становления поля с удаленными структурными помехами:

$$r_{f_H f} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{H_i} - \overline{f_H})(f_i - \overline{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{H_i} - \overline{f_H})^2 \sum_{i=1}^n (f_i - \overline{f})^2}},$$

где f_H и f – выборки плотности вероятности для нормального закона распределения и сигнала соответственно; $\overline{f_H}$ и \overline{f} – выборочные средние; n – число значений в выборке. Поиск порога обнаружения сводится к поиску максимального значения коэффициента корреляции, вычисляемого при переборе значений порога обнаружения от завышенного до заниженного с заданным шагом, определяющим точность поиска. Применение данного критерия дает возможность предельно автоматизировать процесс удаления такого рода помех и тем самым повысить скорость обработки данных в условиях полевых работ. Процедура устранения обнаруженных импульсов структурных помех на кривой становления поля сводится к линейной аппроксимации участка сигнала со структурной помехой. На рис. 3.2 представлена исходная и очищенная от структурных помех ВКФ.

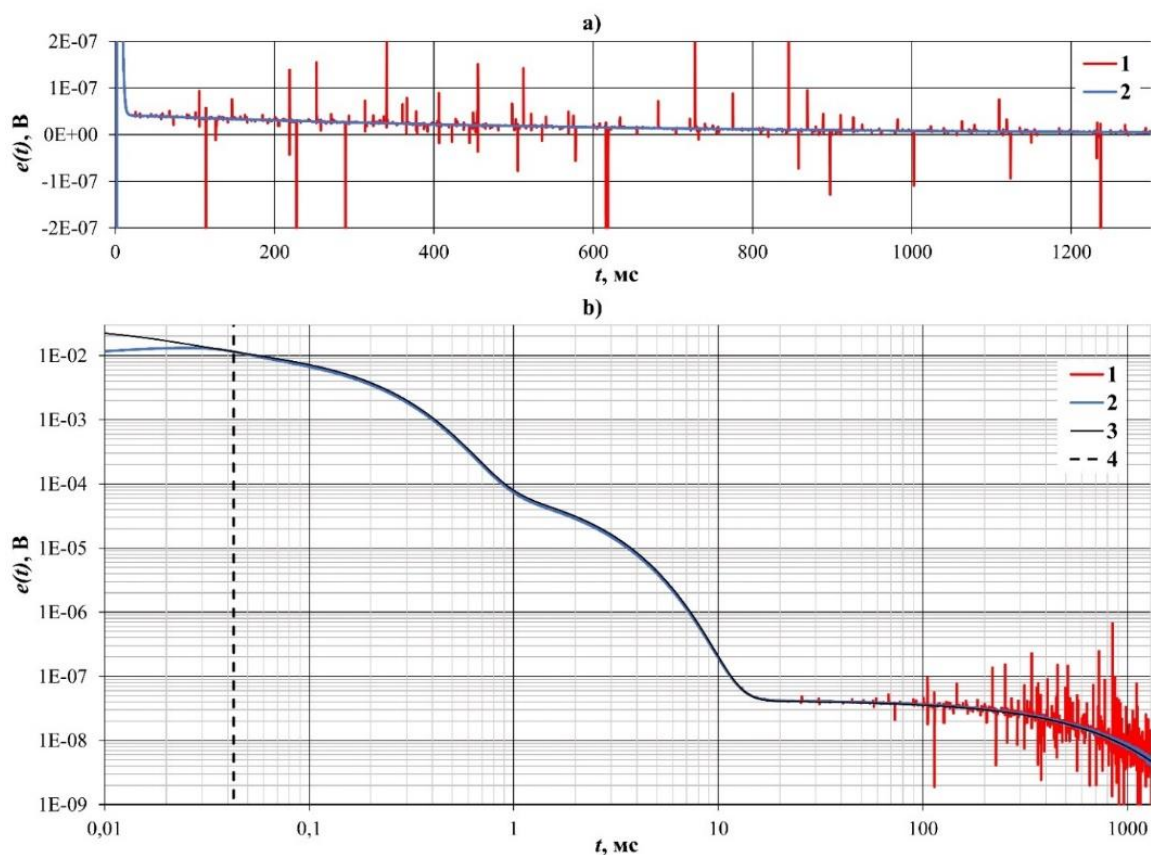


Рисунок 3.2 – ВКФ, полученная для модели, имитирующей горизонтально слоистую среду: а- в линейном масштабе; б- в билогарифмическом масштабе; 1 – график ВКФ, осложненный структурными помехами; 2 – график ВКФ после устранения структурных помех; 3 - график ИПХ; 4 – линия отметки длительности минимального импульса М-последовательности.

В результате удаления структурных помех, их уровень, вычисляемый как размах оставшихся помех от пика до пика, снизился примерно в 930 раз (на 59 дБ) по сравнению с уровнем до их удаления. Представленные в данной главе результаты обосновывают второе защищаемое положение: *Способ автоматического обнаружения и устранения структурных помех, возникающих на кривой становления поля в результате корреляционной обработки непрерывного сигнала отклика среды на шумоподобное зондирующее воздействие, и источники их появления.*

Глава 4. Разработка экспериментального аппаратурно программного измерительного комплекса на основе шумоподобных сигналов

Параграф 4.1. Аппаратура измерительного комплекса ЭРК ШПС. Опираясь на результаты проведенных теоретических исследований, был разработан экспериментальный образец широкополосного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами – ЭРК ШПС. Структурно-функциональная схема ЭРК ШПС представлена на рис. 4.1, внешний вид на рис. 4.2, а его технические параметры в табл. 1.

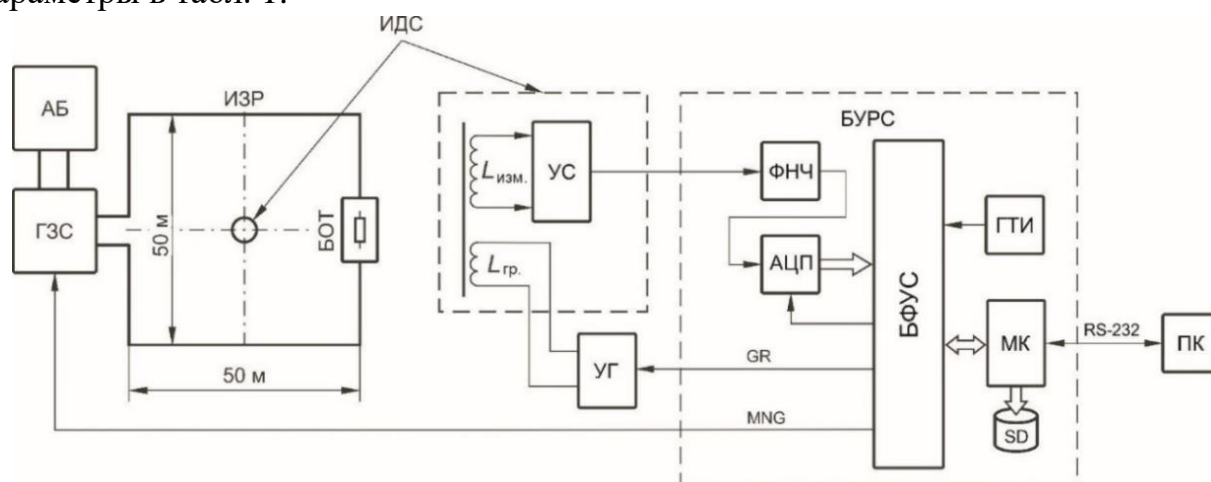


Рисунок 4.1 – Электроразведочный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами, схема структурно-функциональная.

Измерительный комплекс состоит из двух частей: зондирующей и приемно-регистрирующей (рис. 4.1). В зондирующую часть входят генератор зондирующих сигналов (ГЗС), индукционная зондирующая рамка (ИЗР), блок ограничения тока (БОТ) и силовая аккумуляторная батарея (АБ). К приемно-регистрирующей части относятся индукционный датчик сигналов (ИДС), блок управления и регистрации сигналов (БУРС) и устройство градуировки (УГ). ИДС состоит из измерительной ($L_{изм.}$) и градуировочной ($L_{гр.}$) катушек. Измерительная катушка подключена к предварительному усилителю (УС), расположенному в корпусе датчика. БУРС содержит в своем составе: аналого-цифровой преобразователь (АЦП), генератор тактовых импульсов (ГТИ), фильтр низкой частоты (ФНЧ), блок формирования управляющих сигналов (БФУС), плату микроконтроллера (МК) и карту памяти (SD). БУРС подключается к внешнему компьютеру (ПК) посредством интерфейса RS-232. Для предотвращения внешних помех сигналы управляющие работой ГЗС (MNG) и УГ (GR) подключаются по оптоволоконным линиям.

Таблица 1 – Технические параметры ЭРК ШПС

Параметр	Ед. изм.	Значение
Приемно-измерительный канал		
Полоса пропускания	Гц	0.42÷32000
Коэффициент преобразования ИДС	мВ/нТ	75±5
Постоянная времени ИДС	с	0.65
Динамический диапазон регистрируемых сигналов, не менее	дБ	180
Разрядность АЦП	бит	18–24
Частота дискретизации сигналов	кГц	10.0–1638.4
Длительность одиночной шумоподобной М-последовательности	с	0.01–5.12
Разрядность М-последовательности	бит	11–24
Зондирующая установка		
Габариты ИЗР	м	50×50...200×200
Индуктивность ИЗР	мГн	0.4–1.6
Активное сопротивление ИЗР	Ом	2–8
Напряжение силовой аккумуляторной батареи, U_{AB}	В	12–250
Активное сопротивление БОТ, $R_{БОТ}$	Ом	25–200
Амплитуда импульсов тока в ИЗР (Зависит от $R_{БОТ}$ и U_{AB})	А	1.0–10.0
Минимальная длительность импульсов тока в ИЗР	мкс	20
Длительность фронта и среза импульсов тока в ИЗР (При $R_{БОТ}=100$ Ом)	мкс	12



Рисунок 4.2 – Экспериментальный образец измерительного комплекса ЭРК ШПС, внешний вид: 1 – индукционная зондирующая рамка (ИЗР); 2 – индукционный датчик сигналов (ИДС); 3 – генератор зондирующих сигналов (ГЗС); 4 – устройство градуировки (УГ); 5 – блок управления и регистрации сигналов (БУРС); 6 – переносной компьютер (ПК); 7 – блок ограничения тока (БОТ).

Отличительной особенностью предлагаемого метода зондирования от типового является то, что при применении шумоподобных зондирующих сигналов с широким спектром и измерении ЭДС - $e(t)$ в приемной рамке, как в традиционном методе, после корреляционной обработки зарегистрированных сигналов мы будем получать сигнал пропорциональный скорости изменения ЭДС или второй производной от магнитного потока $\Phi''(t) = e'(t)$, так как корреляционная обработка шумоподобных сигналов с широким спектром приводит к дифференцированию сигнала. Поэтому желательно, чтобы датчик регистрируемых сигналов был интегрирующего типа и обеспечивал на своем выходе сигнал пропорциональный магнитному потоку $\Phi(t)$:

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot Q \cdot q}{30} \cdot \left(\frac{\mu_0}{\rho \cdot \pi} \right)^{3/2} \cdot t^{-3/2}.$$

Дальнейшая корреляционная обработка регистрируемого на приемной стороне сигнала позволяет получить кривую, которая, начиная со времени, равного длительности минимального импульса зондирующей М последовательности, будет приближаться к ЭДС. Для этого в состав ЭРК ШПС был введен специально разработанный индукционный датчик интегрирующего типа.

Параграф 4.2. Программное обеспечение измерительного комплекса ЭРК ШПС. Программное обеспечение ЭРК ШПС включает в себя три программы: *BBS_Registrator_ADD* - предназначена для управления режимами работы БУРС, обеспечивает регистрацию и сохранение данных, поступающих с выхода АЦП измерительного канала ЭРК ШПС. *BBS_Terminal_ADD* - предназначена для автоматизации процесса управления режимами и параметрами регистрации сигналов. *BBS_ViewerM_NR* - предназначена для обработки данных модельных, лабораторных и полевых экспериментов на внешнем ПК. В качестве обрабатываемых данных могут выступать как данные полученные в процессе регистрации с выхода измерительного канала ЭРК ШПС, так и данные, генерируемые программным способом.

Параграф 4.3. Полевые эксперименты по тестированию ЭРК ШПС. Для подтверждения теоретического выигрыша в подавлении шумов и структурных помех была проведена серия лабораторных и полевых экспериментов. На рисунке 4.3-б,с приведены участки сигнала становления поля в области малых и больших времен, полученные в результате корреляционной обработки и последующего синхронного накопления (200 накоплений) зарегистрированного сигнала. На кривой становления поля наблюдаются не только структурные помехи (рисунок 4.3с), но и остаточные тональные помехи от промышленной силовой сети переменного тока, а также другие шумы и помехи естественного и искусственного происхождения, спектральные составляющие которых попадают в полосу пропускания измерительного канала (рисунок 4.3д).

После корреляционной обработки и последующего синхронного накопления уровень остаточных шумов и помех (за исключением структурных помех) снизился примерно в 10524 раз (80 дБ). В результате удаления структурных помех при

обработке полевых данных, уровень помех на кривой становления поля, вычисляемый как размах оставшихся помех от пика до пика, снизился примерно в 450 раз (на 53 дБ) по сравнению с уровнем структурных помех (от пика до пика) на кривой становления до их удаления. Таким образом результаты, полученные на математических моделях (*защищаемые положения 1 и 2*) в целом, подтвердились.

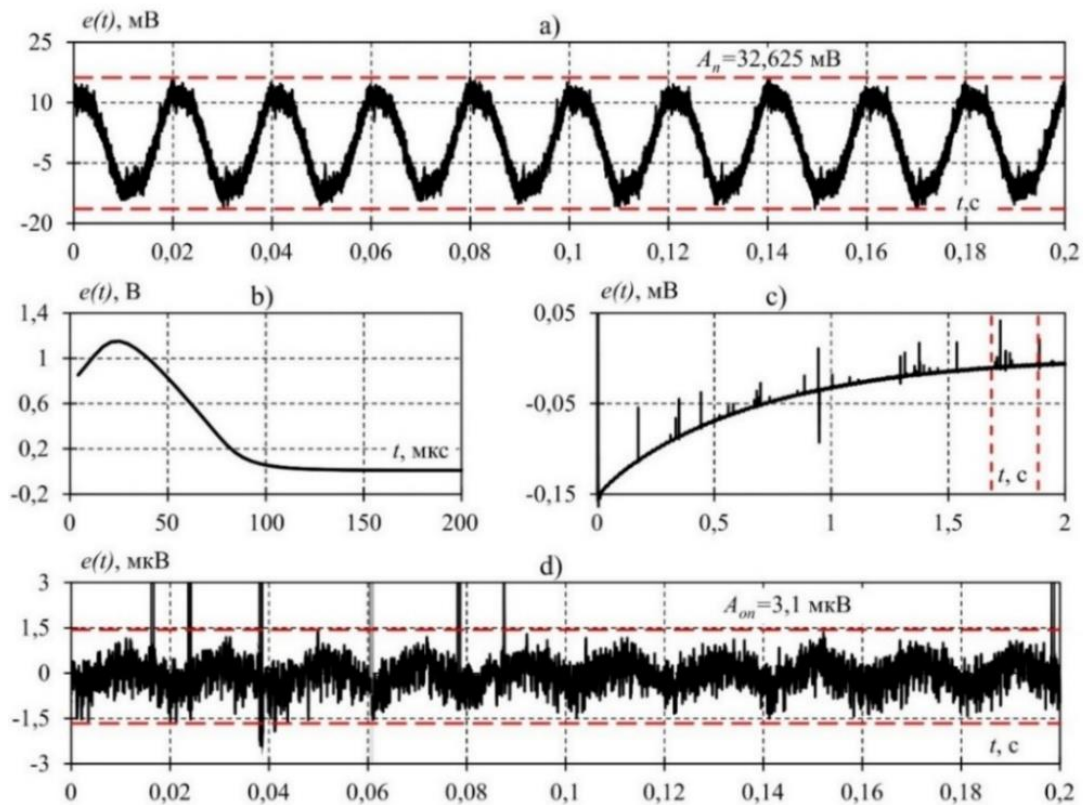


Рисунок 4.3 – Пример сигналов, зарегистрированных на точке «МГД»: запись шума – а); сигнал становления поля в области малых - б) и больших - в) времен; участок сигнала становления поля в области больших времен с исключенной низкочастотной составляющей - д).

Глава 5. Результаты практической апробации созданного образца ЭРК ШПС для ряда пунктов наблюдения на территории Северного Тянь-Шаня

Параграф 5.1. Экспериментальные работы с измерительным комплексом ЭРК ШПС по отработке технологии зондирования земной коры. Для оценки относительной погрешности вычисления кривых зондирования был проведен специальный комплексный полевой эксперимент по зондированию земной коры в точке «МГД», находящейся в непосредственной близости от территории ИС РАН. Эксперимент длился 12 часов. Для численной оценки точности полученных кривых зондирования были построены графики зависимостей мат. ожидания $M(t)$ (средней кривой зондирования), среднеквадратичного отклонения $\sigma(t)$ и относительной погрешности для кривых зондирования $\delta(t)$ приведенные на рис. 5.1.

На основании полученных результатов в первом приближении можно говорить о том, что с помощью измерительного комплекса ЭРК ШПС с доверительной вероятностью 0,9 может быть обеспечен контроль и измерение вариаций сигналов становления поля величиной, определяемой погрешностью

измерения δ . Таким образом получилось, что в конце всего интервала времен становления поля (2 с) минимальный уровень уверенно контролируемых вариаций составит 3%, на 1,5 секунде – 1,0 %, а уже на 0,5 секундах – 0,2 %.

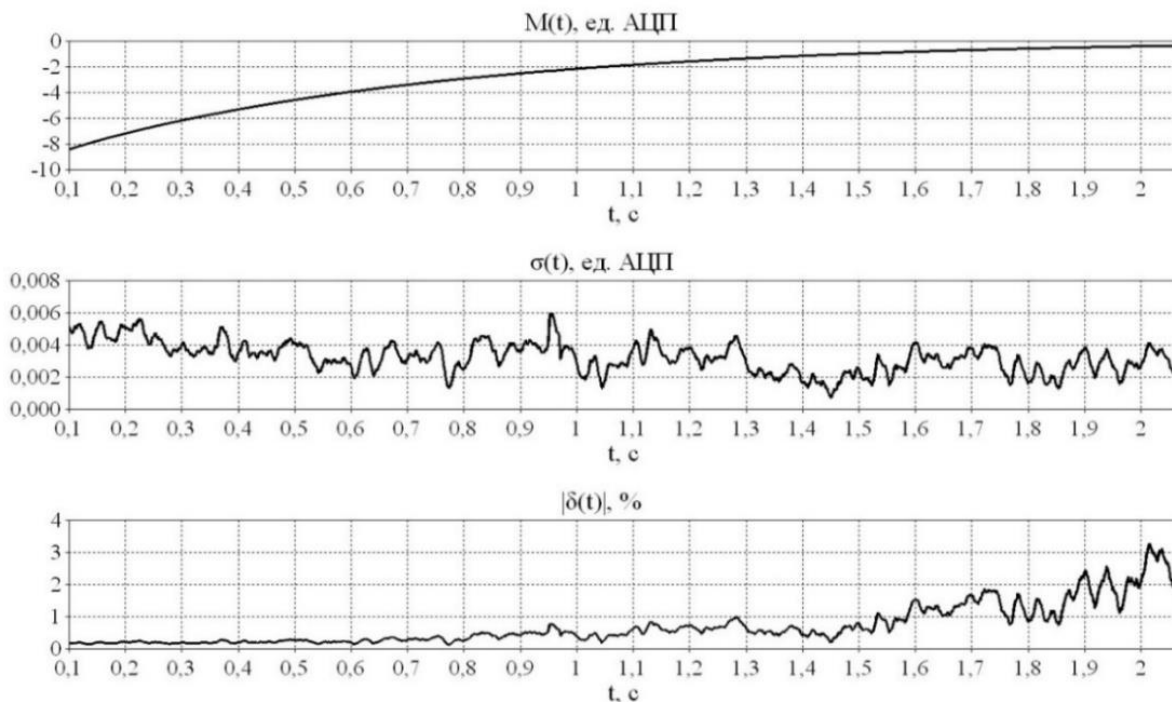


Рисунок 5.1 – Графики мат. ожидания (средняя кривая зондирования) $M(t)$, среднеквадратичного отклонения $\sigma(t)$, относительной погрешности измерения $\delta(t)$ для больших времен становления поля, полученные по данным полевого эксперимента.

Параграф 5.2. Методика получения геоэлектрических характеристик среды в измерительном комплексе ЭРК ШПС. Методика получения геоэлектрических характеристик среды для ЭРК ШПС разрабатывалась с учетом особенностей его аппаратурно-программной реализации.

Важным условием первичной обработки является компенсация не идеальности переходной характеристики ИДС. С целью снижения погрешности интегрирования, особенно на больших временах становления поля при цифровой обработке зарегистрированных сигналов предполагается применить процедуру приведения их ко входу измерительного канала с учетом экспериментально измеренной, по переходной характеристике, постоянной времени ($\tau_{\text{ИДС}}$) схемы ИДС, полученной в результате проведения специальной градуировки измерительного канала ЭРК ШПС и обработки зарегистрированных данных. Для того чтобы выходной сигнал измерительного канала был пропорционален потоку магнитной индукции необходимо вычислить сумму зарегистрированного сигнала с интегралом от него с масштабным коэффициентом $1/\tau_{\text{ИДС}}$.

Дальнейшая обработка сигнала становления поля осуществляется в рамках модели проводящей горизонтальной плоскости (тонкой пленки) в непроводящей среде по методике В.А. Сидорова. Полевое тестирование методики проводилось на данных полевых испытаний изготовленного экспериментального образца ЭРК

ШПС. Учитывая, что основным назначением ЭРК ШПС является использование его в системе активного электромагнитного мониторинга напряженно-деформационных процессов в земной коре помимо параметров S_τ и h_τ вычисляется параметр ρ_τ – кажущееся удельное сопротивление среды. Испытания проводились в четырех точках на территории Бишкекского геодинамического полигона, расположенных друг от друга на расстояниях от 9 до 20 км («МГД», «Кентор», «Кентор 2» и «Чункурчак»). На рис. 5.2 приведены результаты расчета параметров для 4 измерительных пунктов.

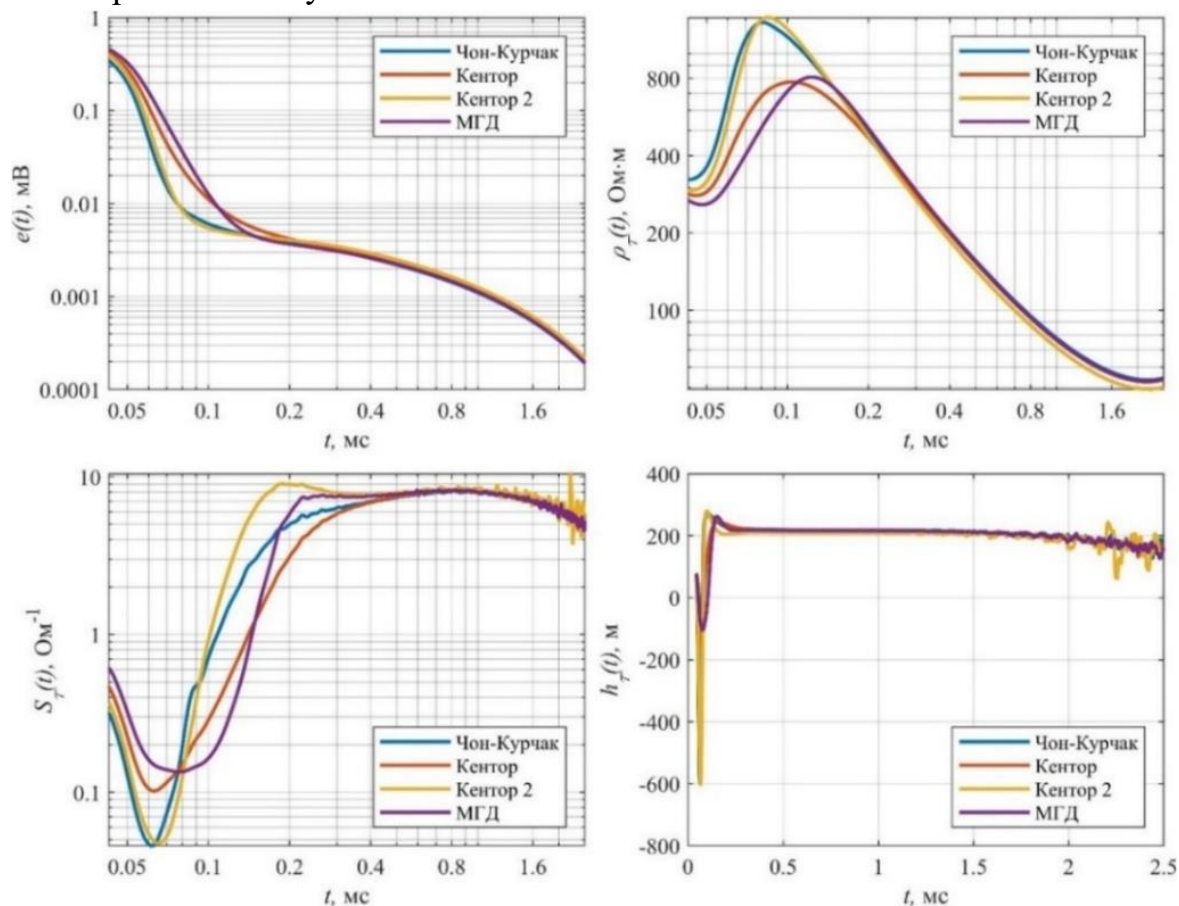


Рисунок 5.2 – Графики кривой становления поля - $e(t)$, кажущегося удельного электрического сопротивления $\rho_\tau(t)$, кажущейся продольной проводимости - $S_\tau(t)$ и кажущейся глубины $h_\tau(t)$ для четырех измерительных пунктов БГП.

Основным контролируемым параметром при изучении современных геодинамических процессов в литосфере получаемым в результате обработки является график изменения кажущегося удельного электрического сопротивления $\rho_\tau(t)$ во времени. На рисунке 5.3 приведен результат обработки данных комплексного полевого эксперимента, выполненного на измерительном пункте «Кентор-2».

В результате обработки 24 сеансов зондирования, выполнявшихся с дискретностью в 1 час, были получены кривые становления поля $e(t)$ по которым были вычислены кривые кажущегося удельного электросопротивления $\rho_\tau(t)$. На рис. 5.3 (верхние графики) приведены усредненные кривые $e(t)$ и $\rho_\tau(t)$ полученные по 24 сеансам зондирования. На кривой $\rho_\tau(t)$ черным цветом выделены участки (окна), на которых вычислялось среднее значение кажущегося удельного сопротивления ρ_τ

для четырех времен становления поля ($0,0433 \sqrt{c}$, $0,104 \sqrt{c}$, $0,126 \sqrt{c}$ и $0,312 \sqrt{c}$). Каждое из выбранных времен характеризует точку излома кривой зондирования. При расчетах время становления поля соотносилось к середине окна, ширина которого возрастает с увеличением времени переходного процесса с шагом, близким к $2\pi\sqrt{2}$. В результате были построены временные ряды кажущегося электросопротивления для четырех характерных точек на кривой становления поля. Также для измерительного пункта «Кентор 2» были рассчитаны компоненты ускорения лунно-солнечных приливов. Расчет теоретических лунно-солнечных вариаций производился с помощью программы TIDE_3.

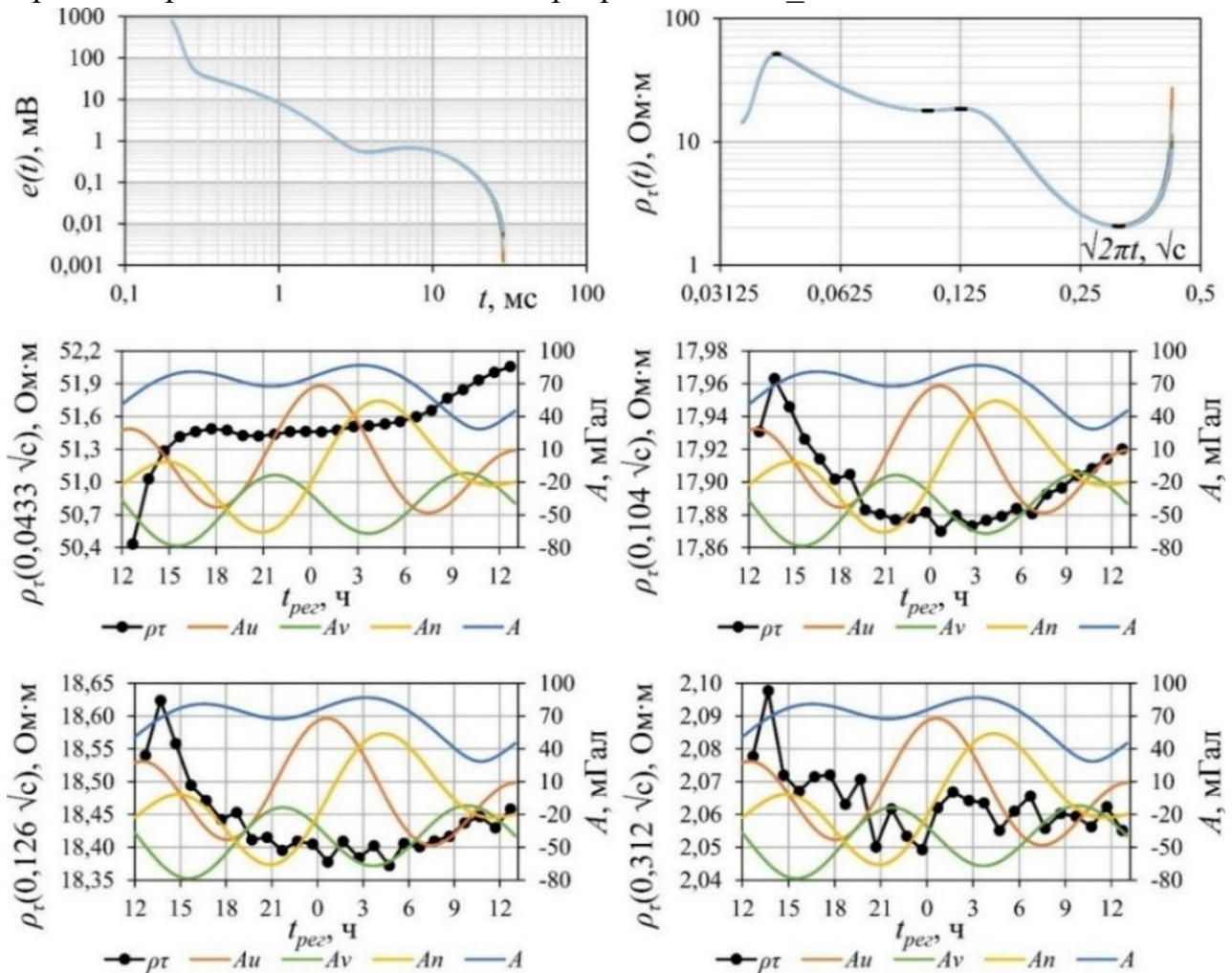


Рисунок 5.3 – Графики кривой становления поля - $e(t)$ и кажущегося удельного электрического сопротивления - $\rho_\tau(t)$ для измерительного пункта «Кентор 2» а также временные ряды построенные по отсчетам кривых кажущегося удельного электросопротивления ρ_τ для четырех характерных точек кривой кажущегося удельного сопротивления с отображением компонент ускорения лунно-солнечных приливов (A_u - горизонтальная компонента "запад-восток"; A_v – горизонтальная компонента "юг-север"; A_n - вертикальная компонента; A – полный вектор.)

Несмотря на относительно небольшие вариации электросопротивления (рис. 5.3), вызванные недостаточной длительностью эксперимента, прослеживается некоторая взаимосвязь между вариациями электросопротивления и лунно-солнечными приливами. Таким образом результаты, приведенные в 4 и 5 главах

диссертационной работы обосновывают третье защищаемое положение: *Экспериментальный образец аппаратурно-программного электроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами, для эффективного применения в методе становления поля.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнены исследования по теоретическому и практическому подтверждению эффективности применения шумоподобных сигналов для метода становления поля. В результате выполненных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Разработана математическая модель электроразведочной системы с шумоподобными зондирующими сигналами. На данной модели удалось подтвердить теоретическое преимущество применения шумоподобных сигналов заключающееся в снижении уровня шума при одинаковой энергетике зондирующих сигналов в сравнении с обычной системой, использующей для зондирования биполярные импульсные последовательности с постоянной длительностью импульсов. Теоретический выигрыш по отношению сигнал/шум составил примерно 100 раз.

2. В процессе макетирования измерительного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами были обнаружены структурные помехи появляющиеся на кривой становления поля после корреляционной обработки. Инструментами математического моделирования удалось определить основные причины их возникновения. Исследования показали, что основной причиной, приводящей к появлению структурных помех, являются нелинейные преобразования сигналов, возникающие в измерительном тракте комплекса, включая исследуемый объект – земную кору. Уровень структурных помех вызванных дискретизацией сигналов в АЦП и проникающими цифровыми помехами на порядок ниже уровня помех, возникающих от нелинейностей. Выявлена функциональная (линейная) связь между амплитудой структурных помех и величиной нелинейных искажений сигналов в измерительном тракте. Выявлена функциональная (близкая к линейной) связь между амплитудой структурных помех и амплитудой измеряемого сигнала. Из этого следует что, вариации любой точки графика импульсной переходной характеристики земли, при стабильных параметрах измерительной аппаратуры, зависят только от изменения параметров исследуемого источника (Земли).

3. Разработан метод уменьшения уровня структурных помех, возникающих на кривых становления поля в процессе корреляционной обработки зарегистрированных шумоподобных сигналов. В основе алгоритма лежит известный способ обнаружения импульсных сигналов на фоне непрерывных шумов и помех по их энергии. Предложен критерий автоматического выбора порога обнаружения структурных помех. Отработка алгоритма проводилась на сигналах становления поля, полученных на экспериментальной точке «Чункурчак», при полевых работах с электроразведочным измерительным комплексом с

шумоподобными сигналами. Применение алгоритма позволило значительно (примерно в 450 раз) улучшить соотношение сигнал/помеха на кривой становления поля в области больших времен.

4. Разработан и изготовлен экспериментальный образец аппаратурно-программного измерительного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами обеспечивающий контроль кривой становления поля благодаря широкому частотному и большому динамическому диапазону регистрируемых сигналов. Проведенные полевые испытания комплекса подтвердили многократный выигрыш в соотношении сигнал/помеха при использовании алгоритмов корреляционной обработки шумоподобных сигналов в сравнении с традиционными алгоритмами синхронного накопления.

5. Первые результаты отработки технологии зондирования Земной коры с использованием шумоподобных сигналов показали, что в конце всего интервала времен становления поля (2 с) относительная погрешность измерения сигналов становления поля составит 3%, на 1,5 секунде – 1,0 %, а уже на 0,5 секундах – 0,2 %.

6. Разработана и отработана в условиях полевого эксперимента методика получения геоэлектрических характеристик среды для экспериментального электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами с учетом особенностей его аппаратурно-программной реализации. Предложено улучшение метода решения обратной задачи ЗСБ в рамках модели с проводящей S плоскостью позволяющее повысить достоверность получаемых результатов. Показана реализация методики в программном обеспечении электроразведочного комплекса. Приведены временные ряды вариаций кажущегося удельного электрического сопротивления среды как основного параметра при изучении современных геодинамических процессов.

Разработанные инструменты математического моделирования могут быть использованы для предварительного изучения и моделирования элементов аппаратуры и методов обработки данных, применяемых при разработке аппаратуры и программного обеспечения активной электроразведки методом становления поля. Созданная электроразведочная аппаратура и программное обеспечение полезны при изучении современных геодинамических процессов в Земной коре.

Перспективы дальнейшего развития аппаратурного обеспечения комплекса ЭРК ШПС связаны прежде всего с разработкой приемного широкополосного индукционного датчика сигналов с повышенной чувствительностью в области низких частот. Развитие программного обеспечения комплекса предполагает реализацию в программном обеспечении ЭРК ШПС инструментов для первичной оценки геоэлектрического разреза в условиях полевого эксперимента. Особый интерес представляет исследование применения шумоподобных сигналов в установках диполь-диполь, которые используются в морской электроразведке методом становления поля.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

основных результатов диссертации

в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, Scopus, RSCI и рекомендованных ВАК РФ:

1. 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;
2. Бобровский В.В., Ильичев П.В., Лашин О.А. Широкополосный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами для электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах // Сейсмические приборы. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 29–48;
3. Бобровский В.В. Особенности корреляционной обработки шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре // Геофизические исслед. – 2022. – Т. 23, №2. – С. 39–54;
4. Бобровский В.В., Ильичёв П.В., Александров П.Н. Методика получения геоэлектрических характеристик среды в экспериментальном электроразведочном комплексе с шумоподобными сигналами // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2023. – Т. 78, № 3. – С. 93–100;
5. Бобровский В.В., Ильичёв П.В. Особенности получения геоэлектрических характеристик среды в экспериментальном электроразведочном комплексе с шумоподобными сигналами // Геодинамика и тектонофизика. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 1–12;

в рецензируемом научном издании индексируемом системой РИНЦ и системой SCOPUS:

6. Bobrovsky V., Ilyichev P. Peculiarity of the use of pseudonoise signals in electrical prospecting equipment [Electronic resource] // Geodynamics and Geoecology 2021. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science929 (2021) 012020IOP Publishing. – 2021;

в прочих рецензируемых научных изданиях входящих в РИНЦ

7. Бобровский В.В., Александров П.Н., Ильичёв П.В. Результаты комплексного полевого эксперимента по отработке технологии зондирования земной коры с широкополосным измерительным комплексом с шумоподобными сигналами // Наука новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2023. – № 5. – С. 18–22;
8. Бобровский В.В., Ильичев П.В. Математическое моделирование предполагаемых источников (причин) «структурных помех» в геоэлектроразведочной аппаратуре с шумоподобными зондирующими сигналами // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докл. VII Междунар. симп., г. Бишкек, 19-24 июня 2017 г. – Бишкек, 2018. – С. 360–370;
9. Ильичев П.В., Бобровский В.В. Вариации уровня нелинейных искажений электрических сигналов в земной коре как контролируемый параметр геофизического мониторинга // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-т. – 2018. – Т. 18, № 12. – С. 108–112;

10. Бобровский В.В., Ильичев П.В. Программа обработки данных регистрации и моделирования электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-т. – 2019. – Т. 19, № 12. – С. 77–83;

свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ

11. Ильичев П. В., Бобровский В. В. Программа для математического моделирования системы активного электромагнитного зондирования земной коры с применением шумоподобных сигналов: Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612291. Дата регистрации 20.03.2013 г.;

12. Бобровский В. В., Ильичев П. В. Программа обработки данных регистрации и моделирования электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами: Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614566. Дата регистрации 10.04.2018 г.;

13. Бобровский В. В. Программа регистрации сигналов электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами: Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614565. Дата регистрации 10.04.2018 г.;

14. Бобровский В. В. Программа регистрации сигналов измерительного комплекса ЭРК ШПС с синхронным накоплением в режиме реального времени: Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613370. Дата регистрации 13.03.2020 г.;

15. Бобровский В. В. Программа устранения структурных помех на кривой становления поля в электроразведочной аппаратуре с шумоподобными сигналами: Свидетельство Российской Федерации о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021665488. Дата регистрации 27.09.2021 г.

Подписано в печать 03.12.2025 г.

Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.

Тираж 100 шт.

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН

123242, г. Москва, Б.Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел./факс: (499) 254 90 88. E-mail: serg@tigra-press.ru