

на правах рукописи



Бобровский Владимир Владимирович

**ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС С
ШУМОПОДОБНЫМИ СИГНАЛАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В ЛИТОСФЕРЕ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ**

Специальность 1.6.9.
«Геофизика»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек – 2025

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

Научный руководитель:	Александров Павел Николаевич - доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории Взаимодействия электромагнитных полей и геологической среды Центра геоэлектромагнитных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.
Официальные оппоненты:	
Ведущая организация:	

Защита диссертации состоится _____ на заседании диссертационного совета ХХ.Х.ХХХ.ХХ, 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.ed.gov.ru>, а также на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, необходимо направлять в двух экземплярах 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 «___» _____ 202__ года.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследование современных геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах невозможно без специализированной высокоточной измерительной аппаратуры. Одним из основных инструментов при изучении геодинамики являются активные электроразведочные методы с контролируемым источником, обеспечивающие высокую точность измерения контролируемых электрических параметров исследуемой среды (земной коры).

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. Экономические затраты на разработку и дальнейшее производство такой аппаратуры также значительно ниже затрат на создание аппаратуры, базирующейся на мощных генераторных установках.

Разработка электроразведочной аппаратуры с применением шумоподобных сигналов может найти самое широкое применение при решении задач в других областях науки и техники, например, при поиске и разведке месторождений полезных ископаемых, обеспечив значительное повышение качества и эффективности поисковых работ.

Степень разработанности темы исследования. Идея применения шумоподобных сигналов (ШПС) в геофизических исследованиях земной коры возникла достаточно давно. Одной из первых попыток применения шумоподобных сигналов в активной электроразведке является работа канадских специалистов по использованию ШПС при электромагнитном зондировании земной коры [Duncan P. M., Bailey R. C., Edwards R. N. at all, 1980]. Установка представляла собой зондирующий электрический диполь длиной 20 км и разнесенные от него на значительные расстояния приемные измерительные пункты с датчиками магнитного поля. Обработка заключалась в расчете взаимной корреляционной функции (ВКФ) между регистрируемым и зондирующим сигналами с последующим вычислением частотного спектра ВКФ, по которому находилась одномерная зависимость кажущегося сопротивления горных пород от глубины. Данная работа послужила прототипом при разработке отечественными специалистами электроразведочной аппаратуры с применением ШПС [Великин А.Б., Великин А.А., 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 А.Б., 2016], основной задачей которого является поиск и обнаружение в земной коре полезных ископаемых, в частности углеводородного сырья, на глубинах до 4000 м. Следует также отметить работу Б.С. Светова с коллегами [Светов Б.С., Алексеев Д.А., Агеев В.В. и др., 2012] посвященную применению ШПС в геоэлектрике. Математическим моделированием установки, расположенной на поверхности однородного полупространства и измеряющей в центре генераторной петли ЭДС, индуцируемую в петле малого размера, было проведено исследование близости получаемой ВКФ к истинной импульсной переходной характеристике среды. В работе теоретически доказано преимущество использования псевдослучайных зондирующих последовательностей по сравнению с традиционными методами зондирования детерминированными последовательностями импульсов с фиксированными длительностью и периодом повторения.

Объект исследования. Объектом исследования является система геофизического мониторинга развития напряженно-деформационных процессов в земной коре сейсмоактивных зон. Одним из основных способов 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 с помощью приемных измерительных станций осуществляется регистрация сигналов отклика земной коры на электромагнитное воздействие. Зарегистрированные данные обрабатываются с помощью специального программного обеспечения. В результате такой обработки строятся временные ряды изменения контролируемого параметра исследуемой среды (удельного электрического сопротивления горных пород на разных глубинах), отражающие развитие напряженно-деформационных процессов, происходящих в земной коре.

Цель исследования. Создание новой, выполненной на современной элементной базе аппаратуры, обеспечивающей повышенное качество и эффективность измерения электрических параметров земной коры методом становления поля. Аппаратура предназначена для электромагнитных исследований современных геодинамических процессов в литосфере Северного Тянь-Шаня с возможностью его использования в существующей системе активного электромагнитного мониторинга земной коры Бишкекского геодинамического полигона (БГП).

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 ШПС 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 необходимо создание соответствующей аппаратуры и программного обеспечения. Для этого был разработан экспериментальный образец аппаратно-программного электроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами (ЭРК ШПС) работающий по методу ЗСБ. При проектировании аппаратуры измерительного комплекса применялись современные системы автоматизированного проектирования Deep Trace, Компас, Quartus. 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, использующиеся 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. Исследованы особенности применения шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре. Выделены предполагаемые источники структурных помех ШПС 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 ШПС. Предложен критерий автоматического выбора порога обнаружения структурных помех ШПС 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 получаемых кривых зондирования на разных временах становления поля. На основании результатов полевых экспериментов в первом приближении 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 %.

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 геодинамического полигона, получены кривые кажущегося удельного сопротивления - $\rho_{\tau}(t)$, кажущейся продольной проводимости - $S_{\tau}(t)$ и глубины проникновения, проводящей S плоскости - $h_{\tau}(t)$. Построены временные ряды вариаций кажущегося удельного сопротивления среды.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Разработанные инструменты математического моделирования электроразведочных систем с шумоподобными сигналами позволили изучить особенности применения шумоподобных зондирующих сигналов в системах активной электроразведки земной коры и выполнить сравнительную оценку лабораторных и полевых экспериментов с результатами математического моделирования. 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.

Исследования по изучению особенностей применения шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре использованы при разработке и

практической реализации экспериментального образца аппаратурно-программного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами. Разработанная методика обнаружения и дальнейшего устранения структурных помех ШПС позволяет преодолеть ограничения накладываемое использованием элементов с нелинейными свойствами при конструировании аппаратуры с применением шумоподобных сигналов.

Предварительные результаты испытаний разработанного аппаратурно-программного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами создают основу для его использования в составе действующей на территории Бишкекского геодинамического полигона системы активного электромагнитного мониторинга земной коры.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель электроразведочной системы с шумоподобными зондирующими сигналами, основанная на задаваемых передаточных характеристиках элементов измерительной аппаратуры и представлении отклика геосреды на зондирующее воздействие в виде интегрирующего инерционного звена первого порядка. Теоретически доказано преимущество применения шумоподобных сигналов заключающееся в более эффективном подавлении шума при равенстве энергий зондирующих сигналов по сравнению с использованием для зондирования становлением поля биполярных импульсов с постоянной длительностью.

2. Установлены источники структурных помех ШПС в электроразведочной аппаратуре с применением шумоподобных сигналов. Предложен способ их автоматического обнаружения и устранения, основанный на критерии поиска оптимального порога обнаружения по максимальному приближению распределения плотности вероятности остаточных помех и шумов к нормальному закону.

3. Экспериментальный образец аппаратурно-программного электроразведочного измерительного комплекса с шумоподобными зондирующими сигналами, подтвердивший результаты теоретических исследований об эффективности применения шумоподобных сигналов в активной электроразведке методом становления поля.

Личный вклад соискателя. Разработка математической модели электроразведочной системы с шумоподобными сигналами была выполнена в соавторстве с заведующим лабораторией перспективных аппаратурных разработок ИС РАН 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 заведующим лабораторией перспективных аппаратурных разработок ИС РАН 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) ИС 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 аппаратурно-программного измерительного комплекса с шумоподобными сигналами.

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

VI международный симпозиум. "Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов" (июнь 2014 г.), г. Бишкек

VII международный симпозиум. "Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов" (июнь 2017 г.), г. Бишкек

VIII международный симпозиум. "Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов" (июнь 2021 г.), г. Бишкек

Одиннадцатые научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. "Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле земли, интерпретация геофизических полей" (Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН 20–24 сентября 2021г.), г. Екатеринбург

Семинар «Современные проблемы геофизики», проводимый Московским государственным университетом совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта.

Семинар «Геолого-геофизический мониторинг литосферы Тянь-Шаня», проводимого Научной станцией РАН в г. Бишкеке совместно с Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта.

V Международная научно-практическая конференция «Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2023» (октябрь 2023 г.) г. Москва.

Основная часть диссертационной работы выполнена в рамках выполнения Государственного задания по теме: «Разработка аппаратно-программных средств и основ технологий электромагнитного мониторинга геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах и оценки их опасностей» в 2014 – 2021 гг. Заключительная часть диссертационной работы выполнена в рамках выполнения Государственного задания по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах» в 2022 – 2023 гг.

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 (три из них имеют переводные варианты на английском языке);

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 80 наименований. Основное содержание представлено на 198 страницах, содержит 86 рисунков и 9 таблиц.

Благодарности. 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. Особую благодарность автор выражает зав. лабораторией перспективных аппаратных разработок П. В. Ильичеву за разработку темы и помощь в работе над диссертацией. 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 (по договору подряда) 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 (обзор литературы)

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. Особый интерес представляют активные электроразведочные методы с контролируемым источником, имеющие повышенное разрешение. 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., Брагин В.Д., Ильичев П.В. 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 этот метод применяется для более детального изучения структуры земной коры. Основной задачей данного исследования является создание аппаратурно-программного измерительного комплекса для электромагнитных исследований современных геодинамических процессов в литосфере Северного Тянь-Шаня с возможностью его использования в существующей системе активного электромагнитного мониторинга земной коры для территории БГП.

Параграф 1.2. Среднестатистический разрез электрической структуры земной коры территории БГП. Для получения надежной информации об особенностях глубинного геоэлектрического разреза необходима высокая точность измерения полезных сигналов на фоне помех естественной и искусственной природы. Это обстоятельство накладывает определенные требования к энергетике источников энергии и чувствительности измерительной аппаратуры используемых при проведении глубинных исследований. 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 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 территории БГП. В табл. 1.1 приведены параметры среднестатистического разреза электрической структуры земной коры, полученные по данным ранее проведенных зондирований земной коры (методами ЧЗ и ЗСБ) в 22 –х точках на территории БГП.

Таблица 1.1- Среднестатистический разрез электрической структуры земной коры территории БГП

№ слоя, i	Глубина залегания, м	Мощность слоя (h_i), м	Диапазон вариаций удельного электрического сопротивления слоя, Ом·м	Среднестатистическое удельное электрическое сопротивление слоя (ρ_i), Ом·м
1	0–300	300	10–300	145
2	300–3000	2700	1000–3000	2000
3	3000–12000	9000	40–120	80
4	12000–25000	13000	1000–3000	2000

Согласно правилу эквивалентности можно записать выражение, связывающее параметры многослойной горизонтально слоистой среды с параметрами эквивалентного однородного слоя:

$$\rho_{\Sigma} = \frac{h_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\rho_i}}. \quad (1.2)$$

Подставив данные, приведенные в табл. 2.1, в формулу (1.2) вычислим среднестатистическое значение удельного электрического сопротивления эквивалентного однородного слоя земной коры для БГП:

$$\rho_{\Sigma} = \frac{25000}{\frac{300}{145} + \frac{2700}{2000} + \frac{9000}{80} + \frac{13000}{2000}} = 204 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Параграф 1.3. Оценка уровней сигналов становления поля применительно к методу ЗСБ для обобщенного геоэлектрического разреза БГП. Для оценки уровней сигналов становления поля применительно к методу ЗСБ взята установка с соосными петлями. В качестве источника первичного поля взята квадратная рамка площадью Q равной 2500 м^2 . Величина ЭДС в приемной рамке, расположенной на поверхности однородного полупространства с удельным электрическим сопротивлением ρ в ближней зоне индукционного источника, определяется выражением:

$$|\Delta U_{Bz}| = \frac{\mu_0 q Q I \left(\frac{\mu_0}{\rho} \right)^{\frac{3}{2}}}{10 \pi^{\frac{3}{2}} t^{\frac{5}{2}}}, \quad (1.3)$$

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 (1.3), необходимо знать величину удельного электрического сопротивления среды ρ и время регистрации становления поля t . Время регистрации становления поля, соответствующее заданной эффективной глубине зондирования – $z_{\text{эф}}$, можно записать следующим образом:

$$t \approx \left(\frac{z_{\text{эф}}}{0.71\sqrt{\rho}} \right). \quad (1.6)$$

Оценочные расчеты выполненные по формулам (1.3) и (1.6) показывают, что для диапазона глубин зондирования от 100 м до 10 км, с учетом среднего удельного электрического сопротивления эквивалентного однородного слоя (204 Ом.м), полученного по данным среднестатистического разреза электрической структуры земной коры на территории Бишкекского геодинимического полигона, динамический диапазон регистрируемых сигналов должен быть не менее 200 дБ.

Глава 2. Теоретическое обоснование применения шумоподобных сигналов в электромагнитных зондированиях становления 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:

$$Y(t) = X(t) \otimes g(t) \quad (2.1)$$

$$R_{XY}(t) = R_{XX}(t) \otimes g(t), \quad (2.2)$$

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.

Предпосылки применения шумоподобных сигналов в геоэлектрике основаны на том, что каждый импульс генерируемой дискретной ШПС-последовательности проходя через линейную систему (Землю) физически сворачивается с импульсной переходной характеристикой земной коры. В результате в пункте наблюдения образуется последовательность измеренных импульсов. Наша задача – найти импульсную переходную характеристику системы, распределенную в импульсах измеренной последовательности.

При правильном выборе ШПС можно добиться того, что ее АКФ будет приближаться к δ -функции Дирака (рис. 2.3 внизу). В этом случае ВКФ на выходе корреляционного приемника будет приближаться к искомой ИПХ геосреды. В качестве ШПС были выбраны бинарные М-последовательности (псевдослучайные последовательности максимальной длины – МП), представляющие собой последовательности биполярных импульсов прямоугольной формы.

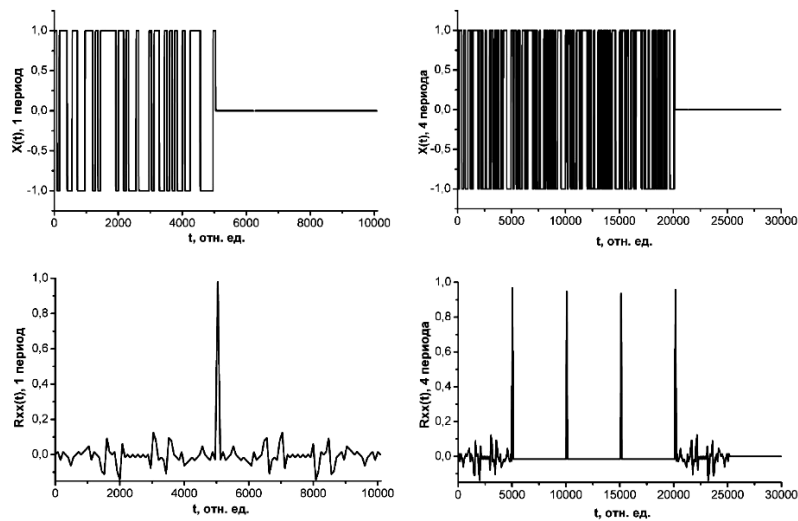


Рисунок 2.3. Изменение формы АКФ шумоподобных сигналов при периодическом их повторении

АКФ одиночной МП помимо основного (главного) лепестка имеет побочные боковые выбросы (рис. 2.3 слева). Эти выбросы ограничивают применение корреляционной обработки одиночных МП в импульсной электроразведке. Однако периодически повторяющиеся МП не имеют боковых выбросов на АКФ и ВКФ (рис. 2.3 справа). Их АКФ по форме приближается к δ -функции Дирака. 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. Фактически к преимуществам, достигаемым при обычном накоплении детерминированных сигналов, добавляются существенные преимущества, получаемые за счет применения корреляционной обработки ШПС.

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.

Модель среды, представлена в виде интегрирующего инерционного звена первого порядка с фиксированными (задаваемыми) параметрами такими как коэффициент передачи и постоянная времени. Для снижения свойственной 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 М-последовательности при начальных условиях, определяемых значениями сигнала, вычисленного к концу предыдущего импульса:

$$U_{0Ci}(t) = U_{Ci} + [(-1)^i \cdot A_{\text{ИПИС}} - U_{Ci}] \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{ср}}}}), \quad (2.7)$$

где: $A_{\text{ИПИС}}$ – 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 ; $0 < t \leq (t_{i+1} - t_i)$ – текущее время, отсчитываемое внутри интервала от t_i до t_{i+1} ; t_i – время начала импульса с номером i в последовательности зондирующих импульсов; t_{i+1} – время начала импульса с номером $i+1$ (конец импульса с номером i); $\tau_{\text{ср}}$ – постоянная времени модели среды (интегрирующего инерционного звена).

Для сравнения характеристик обычных электроразведочных систем с характеристиками системы с применением ИПС в структуру математической модели были включены модели различного рода помех и шумов характерных для исследований, проводимых на территории Северного Тянь-Шаня.

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). Результат реконструкции ИПХ среды по ВКФ для вышеуказанных моделей показал, что вычисляемая дискретно ВКФ близка к ИПХ начиная со времен больших длительности минимального импульса МП. Пример реконструкции приведен на рис. 2.10.

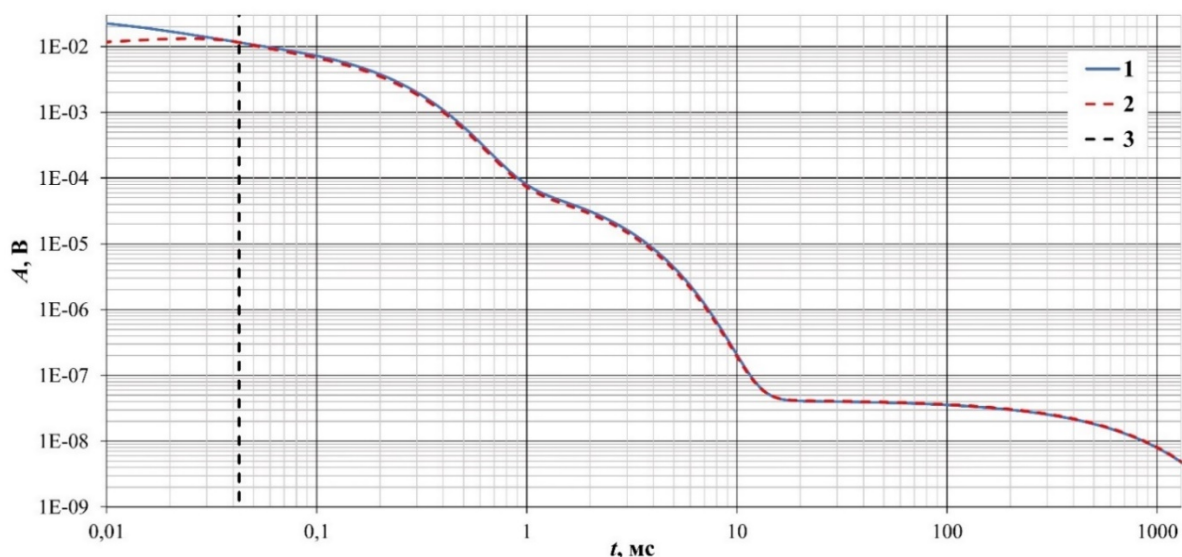


Рисунок 2.10. Графики ИПХ и ВКФ выполненные в билингарифмическом масштабе для ИПХ, представленной в виде суммы четырех интегрирующих инерционных звеньев первого порядка с разными постоянными времени 1 – график ИПХ; 2 – график ВКФ; 3 – линия отметки длительности минимального импульса М-последовательности.

Для оценки эффективности подавления шума при использовании ШПС в сравнении со стандартными методами накопления сигналов в качестве модели шума рассматривался шум с нормальным законом распределения, частотный спектр которого ограничивался полосой пропускания измерительного канала. Для обеспечения фиксированной энергии зондирующих сигналов в каналах модели независимо от длины МП обеспечивалось примерное постоянство длительности МП и импульсов ПП. при нормальном и белом шуме выигрыш (PG), вычисляемый через отношение коэффициента подавления шума в корреляционном канале ($K_{ПК}$) к соответствующему коэффициенту в типовом канале обработки ($K_{ПТ}$) теоретически определяется выражением:

$$PG = \frac{K_{ПК}}{K_{ПТ}} = \sqrt{\frac{L_M(N-2)}{N}}, \quad (2.12)$$

где $L_M = (2^n - 1) \cdot T_{min}$ – длительность МП, n – разрядность МП, T_{min} – длительность такта (минимальная длительность импульсов) МП в относительных единицах, N – число накоплений МП. На рис. 2.12 приведены зависимости коэффициента подавления шумов в корреляционном канале обработки КПК и выигрыша в подавлении шумов PG в этом канале по отношению к типовому. Выигрыш в подавлении шумов в корреляционном канале обработки по сравнению с типовым незначительно (примерно на 20 %) меньше теоретического. Это объясняется тем, что при моделировании в качестве шума была использована модель шума, приближенная к реальным условиям с ограниченным частотным спектром, определяемым полосой пропускания измерительного канала.

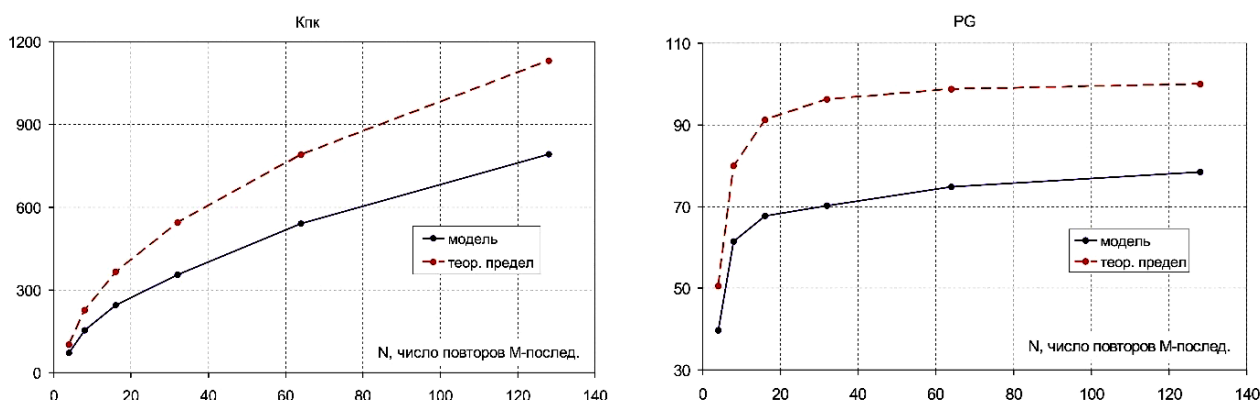


Рисунок 2.12. Зависимости коэффициента подавления шумов в корреляционном канале $K_{ПК}$ и выигрыша в подавлении шумов в корреляционном канале в сравнении с типовым PG от числа повторов М-последовательностей длиной 1023 при длительности такта 10. Красный пунктир – теоретические зависимости

На основании рис. 2.12 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.

Глава 3. Особенности применения шумоподобных сигналов в импульсной электроразведке

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

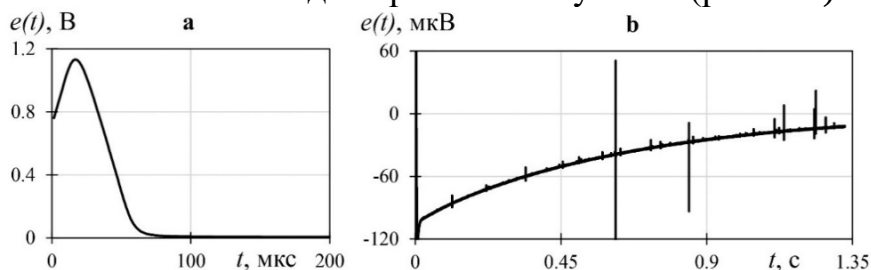


Рисунок 3.1. Кривая становления поля, полученная на экспериментальной точке «Чункурчак»: а - на малых и б - на больших временах (выполнено автором)

Их форма и временное положение на кривой становления связаны с параметрами и структурой зондирующих и принимаемых шумоподобных сигналов поэтому они получили такое название. На больших временах становления поля амплитуда импульсов структурных помех ШПС становится соизмеримой с уровнем сигнала становления поля и даже может значительно превышать его (рис. 3.1b). С помощью известных стандартных процедур цифровой обработки сигналов (например, с помощью частотной фильтрации) невозможно подавить эти помехи без искажения формы полезного сигнала становления поля.

На специально разработанных математических моделях были исследованы следующие предполагаемые физические источники структурных помех ШПС:

- 1) процесс преобразования (дискретизации) сигналов аналого-цифровым преобразователем (АЦП),
- 2) нелинейность характеристик передачи и преобразования сигналов в измерительной системе,
- 3) «пролезающие» через паразитные цепи сигналы от цифровых узлов измерительного комплекса.

Параграф 3.1. Дискретизация сигналов как источник структурных помех ШПС

В современных системах регистрации сигналов активно применяются методы цифровой обработки, а следовательно сигналы, поступающие с выхода измерительного канала, подвергаются дискретизации, то есть наблюдаются только в определенные моменты времени. Уровень структурных помех ШПС, возникающих при дискретизации сигналов, стабилен и зависит лишь от разрядности применяемого АЦП. Численно уровень структурных помех ШПС, вызванных дискретизацией сигнала примерно на порядок меньше веса младшего разряда (дискреты) АЦП. Следовательно, снижение уровня этих помех достигается увеличением разрядности АЦП, используемого 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 представляет собой функцию отличную от линейной (степенная, логарифмическая, синусоидальная и т.д.) Такую зависимость называют передаточной характеристикой или функцией преобразования нелинейного звена. Предполагаемые и 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 ШПС. 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 пролезающих цифровых сигналов, как источника появления структурных помех ШПС

С целью оценки влияния помех, возникающих в измерительном тракте ЭРК ШПС от работы цифровых схем на появляющиеся после корреляционной обработки сигналов структурные помехи ШПС была разработана модель, представляющая пролезающие 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 ШПС на кривой становления поля. Для уменьшения уровня структурных помех ШПС 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 ШПС выполняется в разностной кривой, получаемой вычитанием из кривой становления поля ее медленно меняющейся (низкочастотной) составляющей. Структурные помехи ШПС 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 ($r_{f_{nf}}$) между вычисленным распределением плотности вероятности и функцией нормального закона распределения для сигнала становления поля с удаленными структурными помехами ШПС:

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

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 с кривой становления поля сводится к линейной аппроксимации участка сигнала со структурной помехой. Так как длительность удаляемых участков сигнала с импульсами значительно меньше длительности временных интервалов между ними то замена их на прямую линию практически не влияет на форму кривой становления поля.

На рис. 3.10 представлена исходная и очищенная от структурных помех ВКФ. В результате удаления структурных помех на ВКФ, уровень помех на кривой становления поля, вычисляемый как размах оставшихся помех от пика до пика, снизился примерно в 930 раз (на 59 дБ) по сравнению с уровнем структурных помех (от пика до пика) на кривой становления до их удаления.

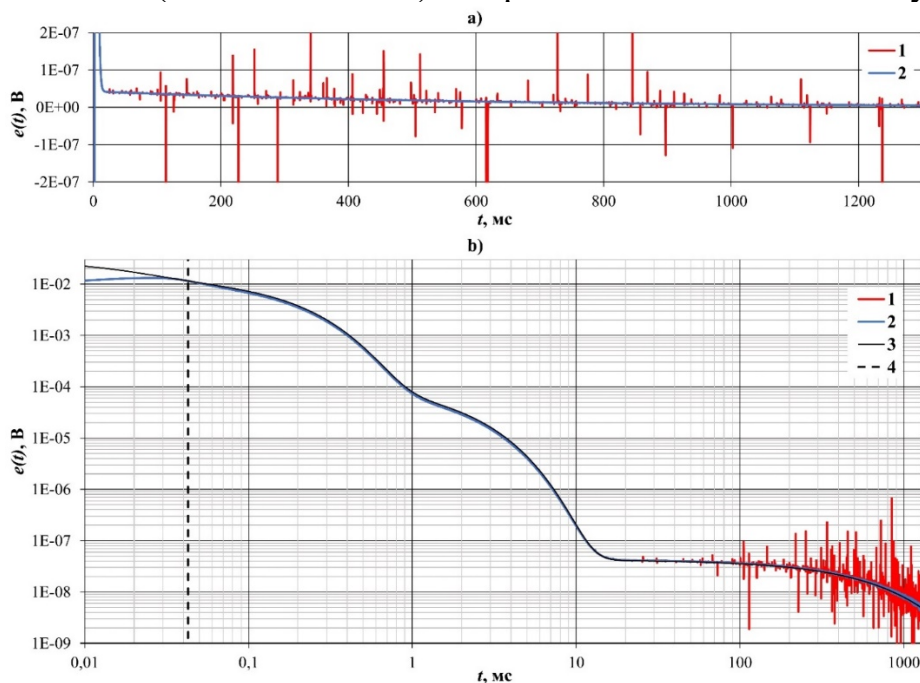


Рисунок 3.10. ВКФ, полученная для упрощенной модели, имитирующей горизонтально слоистую среду: а- в линейном масштабе по осям; б- ВКФ и

ИПХ в билогарифмическом масштабе по осям (выполнено автором)

1 – график ВКФ, осложненный структурными помехами ШПС; 2 – график ВКФ после устранения структурных помех ШПС; 3 - график ИПХ; 4 – линия отметки длительности минимального импульса М-последовательности.

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. На рис. 4.1 показан внешний вид экспериментального образца измерительного комплекса ЭРК ШПС. Технические параметры измерительного комплекса приведены в табл. 4.1. На рис. 4.2 представлена структурно-функциональная схема измерительного комплекса.



Рисунок 4.1. 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) (выполнено автором)

Таблица 4.1 - Технические параметры ЭРК ШПС

Параметр	Ед. из м.	Значение	Примечание
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	А	1.0–10.0	Зависит от $R_{БОТ}$ и U_{AB}
Минимальная длительность импульсов тока в зондирующей рамке	мкс	20	
Длительность фронта и среза импульсов тока в зондирующей рамке	мкс	12	При $R_{БОТ}=100$ Ом

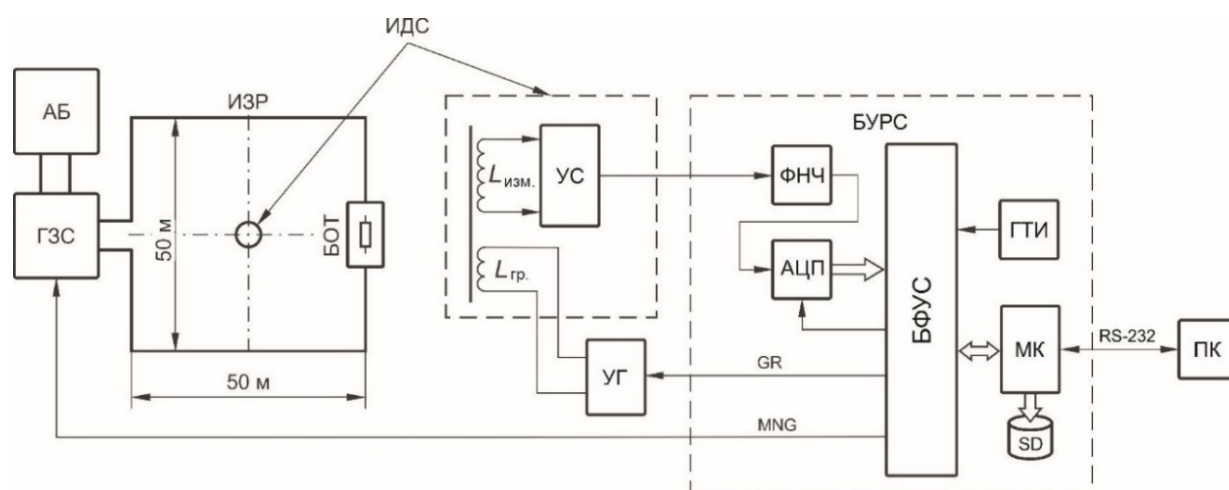


Рисунок 4.2. Электроразведочный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами, схема структурно-функциональная: ИЗР – индукционная зондирующая рамка; БОТ – блок ограничения тока; ГЗС – генератор зондирующих сигналов; АБ – силовая аккумуляторная батарея; ИДС – индукционный датчик сигналов; УС – усилитель сигналов; УГ – устройство градуировки; БУРС – блок управления и регистрации сигналов; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ГТИ – генератор тактовых импульсов; ФНЧ – фильтр низкой частоты; БФУС – блок формирования управляющих сигналов; МК – микроконтроллер; SD – карта памяти; ПК – переносной компьютер; $L_{изм.}$ – измерительная катушка ИДС, $L_{гр.}$ – градуировочная катушка ИДС; GR – сигналы управляющие работой УГ; MNG – сигналы, управляющие работой ГЗС; RS-232 – последовательный интерфейс

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 $\Phi(t)$:

$$\Phi(t) = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot Q \cdot q}{30} \cdot \left(\frac{\mu_0}{\rho \cdot \pi} \right)^{3/2} \cdot t^{-3/2}. \quad (5.1)$$

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 4.9-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 4.9с), 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 4.9д).

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 в целом, подтвердились.

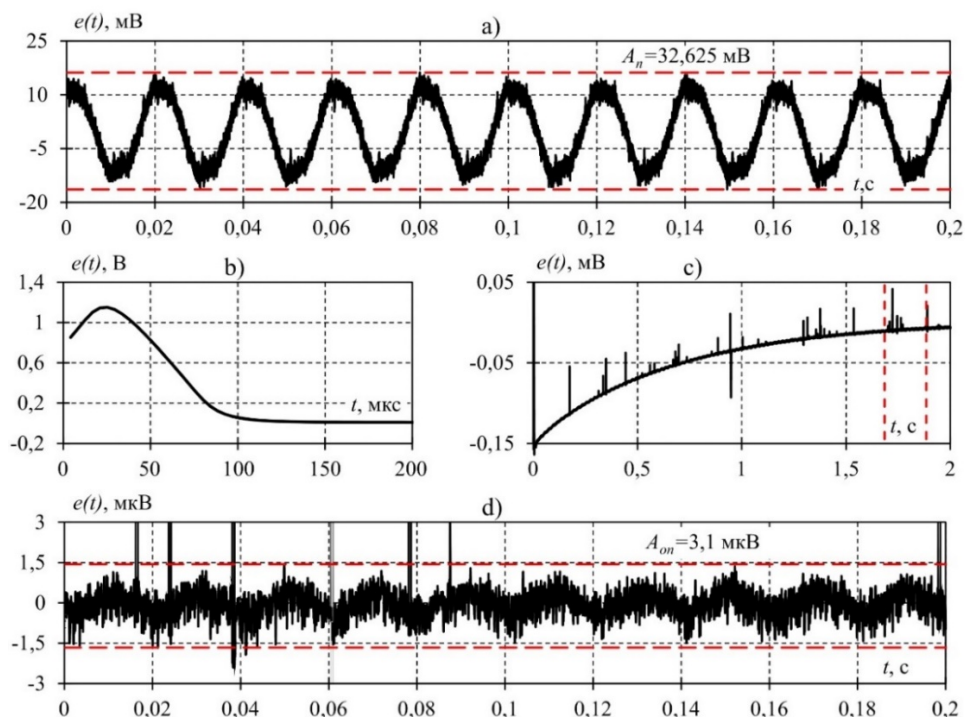


Рисунок 4.9. Пример сигналов, зарегистрированных на точке «МГД»: запись шума – а); сигнал становления поля в области малых - б) и больших - в) времен; участок сигнала становления поля в области больших времен с исключенной низкочастотной составляющей - д) (выполнено автором)

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 НС 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. 5.3.

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 %.

С учетом ранее полученной величины удельного электрического сопротивления однородного слоя $\rho = 204$ Ом·м эквивалентного среднестатистическому электрическому разрезу земной коры территории Бишкекского геодинамического полигона, можно говорить о хорошей возможности контроля вариаций этого сопротивления на глубинах до 9000 м.

Конечно, это достаточно грубая оценка и для разных точек на поверхности Земли в зависимости от вертикального электрического разреза земной коры в этих точках могут быть получены другие величины погрешностей и глубин зондирования.

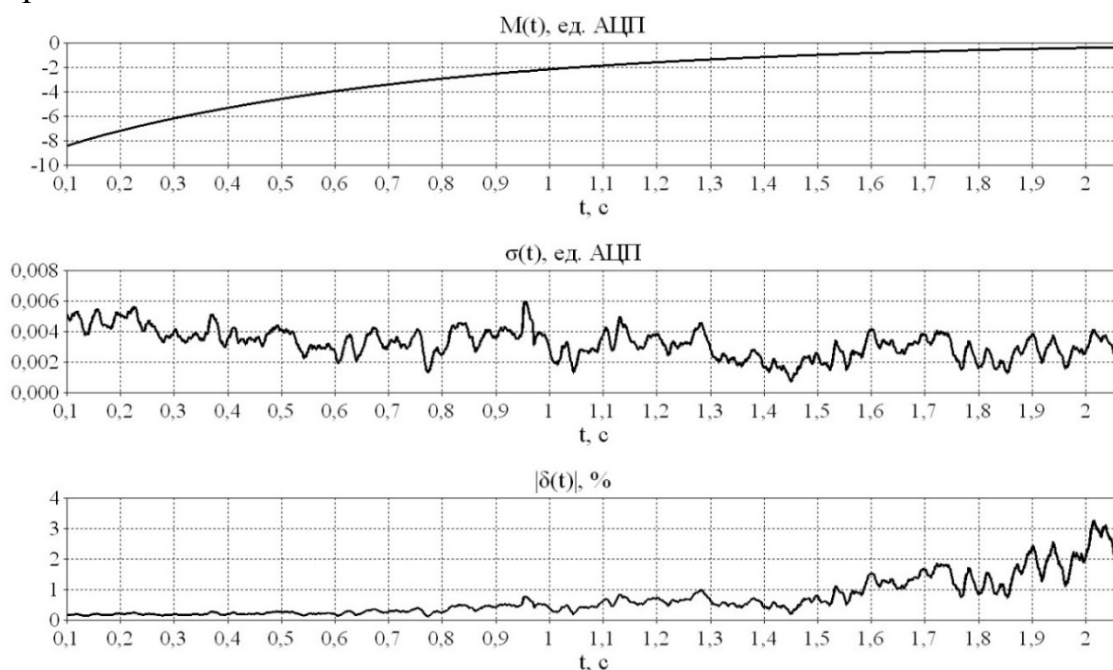


Рисунок 5.3. Графики мат. ожидания (средняя кривая зондирования) $M(t)$, среднеквадратичного отклонения $\sigma(t)$, относительной погрешности измерения $\delta(t)$ для больших времен становления поля, полученные по данным полевого эксперимента (выполнено автором совместно с П.В. Ильичевым)

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.

Реальный датчик не является идеальным интегратором что приводит к увеличению погрешности при получении кривой становления поля особенно на больших временах. Поэтому 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. Решение обратной задачи ЗСБ в рамках методики В.А. Сидорова сводится к численному решению уравнения:

$$\left(\frac{1}{m^2} - 16\right)(1 + 4m^2)^{\frac{3}{2}} - K\mu_0 r \cdot \frac{\frac{dU(t)}{dt}}{U^2(t)} = 0,$$

относительно параметра m где $K = \frac{6M}{r^2}$, $U(t)$ – кривая становления поля, M – магнитный момент, r – радиус приемной петли. В результате решения данного уравнения получим для каждого момента времени t значение $m(t)$. Зная $m(t)$, находим:

$$\begin{cases} S_\tau(t) = \frac{KF(m(t))}{U(t)} \\ h_\tau(t) = m(t)r - \frac{t}{\mu_0 S(t)} \end{cases},$$

где S_τ и h_τ соответственно кажущаяся продольная проводимость и кажущаяся глубина проникновения пленки Прайса-Шейнмана а $F(m(t)) = \frac{m(t)}{(1+4m(t)^2)^{\frac{5}{2}}}$.

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 (БГП), расположенных друг от друга на расстояниях от 9 до 20 км («МГД», «Кентор», «Кентор 2» и «Чункурчак»). На рис. 5.9 приведены результаты расчета параметров для 4 измерительных пунктов.

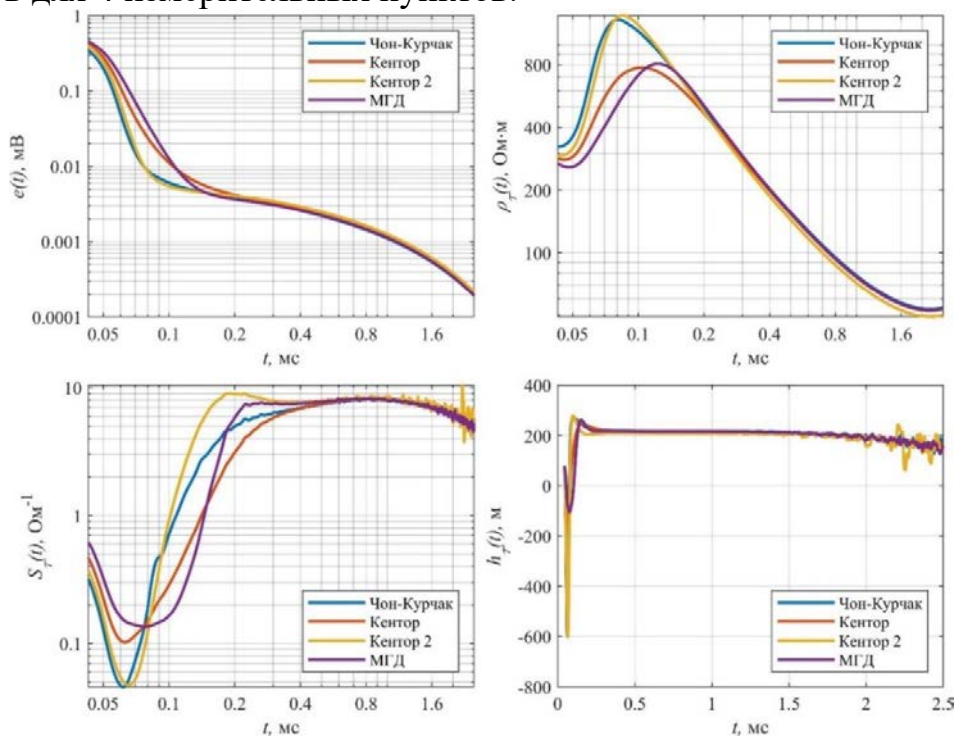


Рисунок 5.9. Графики кривой становления поля - $e(t)$, кажущегося удельного электрического сопротивления $\rho_\tau(t)$, кажущейся продольной проводимости - $S_\tau(t)$ и глубины проникновения пленки $h_\tau(t)$ для четырех измерительных пунктов БГП (выполнено автором)

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 рис. 5.10 приведен результат обработки данных комплексного полевого эксперимента по зондированию земной коры описанного выше. В результате обработки 11 сеансов зондирования, выполнявшихся с дискретностью в 1 час, были получены кривые становления поля $e(t)$ по которым были вычислены кривые кажущегося удельного электросопротивления $\rho_{\tau}(t)$. В результате были построены временные ряды вариаций кажущегося электросопротивления для двух характерных точек с временами 0.03 и 0.11 секунды. Каждое из выбранных времен характеризует точку излома кривой зондирования.

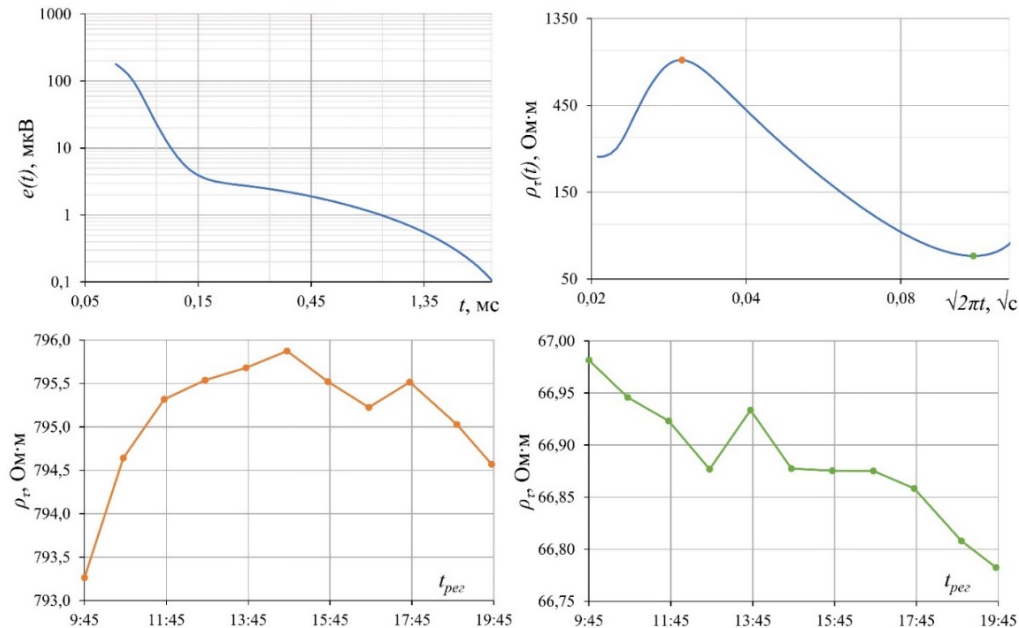


Рисунок 5.10. Графики кривой становления поля - $e(t)$ и кажущегося удельного электрического сопротивления - $\rho_{\tau}(t)$ для измерительного пункта «МГД» а также временные ряды построенные по отсчетам кривых кажущегося удельного электросопротивления ρ_{τ} в точке 0.03 секунды (оранжевый график) и 0.11 сек (зеленый график) (выполнено автором)

Малые вариации электросопротивления, видимые на графике связаны с небольшой продолжительностью эксперимента. Для снижения флуктуаций, вызванных остаточными шумами на кривой становления поля выборки ρ_{τ} были получены путем динамической фильтрации. В простейшем случае подобный процесс сводится к усреднению полученных значений в окне, ширина которого возрастает с увеличением времени переходного процесса с шагом, близким к $2\pi\sqrt{2}$.

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 ШПС 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 ШПС, являются нелинейные преобразования сигналов, возникающие в измерительном тракте комплекса, включая исследуемый объект – земную кору. Уровень структурных помех ШПС вызванных дискретизацией сигналов в АЦП и «пролезающими» цифровыми помехами на порядок ниже уровня помех, возникающих от нелинейностей. Выявлена функциональная (линейная) связь между амплитудой структурных помех ШПС и величиной нелинейных искажений сигналов в измерительном тракте. Выявлена функциональная (близкая к линейной) связь между амплитудой структурных помех ШПС 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). Это позволит в дальнейшем использовать измерительный комплекс в задачах мониторинга.

3. 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.

4. Разработан метод уменьшения уровня структурных помех ШПС, 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 ШПС. 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.

5. Начаты работы по отработке технологии зондирования земной коры с использованием шумоподобных сигналов, включающую в себя методику проведения измерений в реальных полевых условиях. Первые результаты показали, 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 %. С учетом удельного электрического сопротивления для однородного слоя $\rho = 204 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, эквивалентного среднестатистическому электрическому разрезу земной коры территории Бишкекского геодинамического полигона, можно говорить о хорошей возможности контроля вариаций этого сопротивления на глубинах до 9000 м.

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 геодинамических процессов в литосфере Северного Тянь-Шаня.

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.** Применение шумоподобных сигналов в системах активной геоэлектроразведки (результаты математического моделирования и полевого эксперимента) [Текст] / П.В. Ильичев, В.В. Бобровский // Сейсмические приборы. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 5–19; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21673071>

[In English] Ilyichev P.V. Application of pseudonoise signals in systems of active geoelectric exploration (Results of mathematical simulation and field experiments) [Text] / P.V. Ilyichev, V.V. Bobrovsky // Springer, Seismic Instruments. – 2015. Vol. 50, N. 2 – P. 5-19;

Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.3103/S0747923915010089>

2. **Бобровский В.В.** Широкополосный измерительный комплекс с шумоподобными сигналами для электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов в сейсмоактивных зонах [Текст] / В. В. Бобровский, П. В. Ильичев, О. А. Лашин // Сейсмические приборы. – 2021. – Т. 57, № 1. – С.29–48; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46134167>

[In English] Bobrovsky V.V. Broadband Measuring Complex with Pseudonoise Signals for Electromagnetic Monitoring of Modern Geodynamic Processes in Seismically Active Zones [Text] / V.V. Bobrovsky, P.V. Ilyichev, O.A. Lashin // Springer, Seismic Instruments. – 2021. Vol. 57, N. 4 – P. 384-396;

Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.3103/S0747923921040034>

3. **Бобровский В.В.** Особенности корреляционной обработки шумоподобных сигналов в электроразведочной аппаратуре [Текст] / В.В. Бобровский // Геофизические исслед. – 2022. – Т. 23, №2. – С. 39–54; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48770576>

[In English] Bobrovskii V.V. Peculiarities of Correlation Processing of Pseudo Noise Signals in Controlled-Source Electromagnetic Instruments. Izv., Phys. Solid Earth 60, 762–771 (2024); Режим доступа:

<https://link.springer.com/article/10.1134/S1069351324700678>

4. **Бобровский В.В.** Методика получения геоэлектрических характеристик среды в экспериментальном электроразведочном комплексе с шумоподобными сигналами [Текст] / В.В. Бобровский, П.В. Ильичёв, П.Н. Александров // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2023. – Т. 78, № 3. – С. 93–100; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54889998>

5. **Бобровский В. В.** Особенности получения геоэлектрических характеристик среды в экспериментальном электроразведочном комплексе с шумоподобными сигналами [Текст] / В. В. Бобровский, П. В. Ильичёв // Геодинамика и тектонофизика. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 1–12; Режим доступа: <https://www.gt-crust.ru/jour/article/view/1893>

в рецензируемом научном издании индексируемом системой РИНЦ и системой SCOPUS

6. **Bobrovsky V.** Peculiarity of the use of pseudonoise signals in electrical prospecting equipment [Electronic resource] / V. Bobrovsky, P. Ilyichev // Geodynamics and Geoecology 2021. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science929 (2021) 012020IOP Publishing. – 2021; Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/929/1/012020>

в прочих рецензируемых научных изданиях входящих в РИНЦ

7. **Бобровский, В.В.** Результаты комплексного полевого эксперимента по отработке технологии зондирования земной коры с широкополосным измерительным комплексом с шумоподобными сигналами [Текст] / В.В. Бобровский, П.Н. Александров, П.В. Ильичёв // Наука новые технологии и инновации Кыргызстана. – 2023. – № 5. – С. 18–22; Режим доступа: <http://www.science-journal.kg/ru/journal/1/about>

8. **Бобровский, В. В.** Математическое моделирование предполагаемых источников (причин) «структурных помех» в геоэлектроразведочной аппаратуре с шумоподобными зондирующими сигналами [Текст] / В. В. Бобровский, П. В. Ильичев // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докл. VII Междунар. симп., г. Бишкек, 19-24 июня 2017 г. – Бишкек, 2018. – С. 360–370; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36672351>

9. **Ильичев, П. В.** Вариации уровня нелинейных искажений электрических сигналов в земной коре как контролируемый параметр геофизического мониторинга [Текст] / П. В. Ильичев, В. В. Бобровский // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-т. – 2018. – Т. 18, № 12. – С. 108–112; Режим доступа: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/24/751>

10. **Бобровский, В. В.** Программа обработки данных регистрации и моделирования электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами [Текст] / В. В. Бобровский, П. В. Ильичёв // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-т. – 2019. – Т. 19, № 12. – С. 77–83; Режим доступа: <http://vestnik.krsu.edu.kg/archive/70/2859>

авторские свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ

11. А. с. № 2013612291 Российская Федерация. Программа для математического моделирования системы активного электромагнитного зондирования земной коры с применением шумоподобных сигналов [Текст] / **П. В. Ильичев (KG)**, В. В. Бобровский (KG); Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Науч. станция Рос. АН в г. Бишкеке (НС РАН) (KG). Заявка № 2012661584; заявл. 25.12.2012; зарегистрир. 20.02.2013; опубл. 20.03.2013, (Ч. 1.). 75,1 Кб; Режим доступа: <https://www.fips.ru/registers-web/action?acName=clickRegister®Name=EVM>

12. А. с. № 2018614566 Российская Федерация. Программа обработки данных регистрации и моделирования электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами [Текст] / **В. В. Бобровский (RU)**, П. В. Ильичев (RU); Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Науч. ст. Рос. АН в г. Бишкеке (НС РАН) (KG). Заявка № 2018611996; заявл. 20.02.2018; зарегистрир. 10.04.2018; опубл. 10.04.2018, Бюл. № 4, (Ч. 1.). 3,27 Мб; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42347937>

13. А. с. № 2018614565 Российская Федерация. Программа регистрации сигналов электроразведочного комплекса с шумоподобными сигналами [Текст] / **В. В. Бобровский (RU)**; Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Науч.

ст. Рос. АН в г. Бишкеке (НС РАН) (KG). Заявка № 2018611997; заявл. 20.02.2018; зарегистрир. 10.04.2018; опубл. 10.04.2018, Бюл. № 4, (Ч. 1.). 33 Кб; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39293968>

14. А. с. № 2020613370 Российская Федерация. Программа регистрации сигналов измерительного комплекса ЭРК ШПС с синхронным накоплением в режиме реального времени [Текст] / **В. В. Бобровский (RU)**; Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Науч. ст. Рос. АН в г. Бишкеке (НС РАН) (KG). Заявка № 2020612256; заявл. 03.03.2020; зарегистрир. 13.03.2020; опубл. 13.03.2020, Бюл. № 3, (Ч. 1.). 29,2 Кб; Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42586894>

15. А. с. № 2021665488 Российская Федерация. Программа устранения структурных помех на кривой становления поля в электроразведочной аппаратуре с шумоподобными сигналами [Текст] / **В. В. Бобровский (RU)**; Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Науч. ст. Рос. АН в г. Бишкеке (НС РАН) (KG). Заявка № 2021664722; заявл. 21.09.2021; зарегистрир. 27.09.2021; опубл. 27.09.2021, Бюл. № 10, (Ч. 1.). 117 Кб. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47117474>