



Фаттахов Евгений Альбертович

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДЛИТЕЛЬНЫХ РЯДОВ
ГЕОДЕФОРМАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ И
НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ РЕГИОНАХ**

Специальность 1.6.9.
Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в лаборатории «Современной и прикладной геодинамики» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Научный руководитель **Кузьмин Юрий Олегович** - доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по вопросам прикладной геодинамики и мониторинга ответственных объектов, главный научный сотрудник лаборатории «Современной и прикладной геодинамики» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук.

Официальные оппоненты: **Спивак Александр Александрович** – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Приповерхностной геофизики» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук;

Гаврилов Валерий Александрович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Комплексного мониторинга сейсмоактивных сред» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук, г. Москва.**

Защита диссертации состоится **25 апреля 2024 г. в 14 часов** на заседании Диссертационного совета 24.1.132.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д.10, стр.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации vak.ed.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Жосткову Руслану Александровичу.

Автореферат разослан «___» марта 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Р.А. Жостков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований

Актуальность тематики рассматриваемых в диссертации материалов обусловлена необходимостью совершенствования существующих технологий и методик обработки геодеформационных наблюдений. Накопление длительных рядов геодеформационных наблюдений позволяет детальнее оценивать текущую обстановку горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности за длительный промежуток времени, а также оценивать эффективность используемых методов измерения различных геодеформационных процессов. При этом развитие аппаратной базы приводит к тому, что помимо полезного сигнала, очень часто фиксируются помехи, искажая конечный результат. Тем самым необходимо тщательно обрабатывать исходные длительные ряды наблюдений специальными программами для геофизического мониторинга.

Цели и задачи исследований

Целью диссертационной работы является совершенствование технологии анализа и интерпретации длительных рядов мониторинга горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности, полученных на геодинамических полигонах в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие задачи:

1. Разработка алгоритма статистического анализа рядов исходных данных длительных геодеформационных наблюдений;
2. Проведение спектрально-временного анализа длительных рядов геофизических и геодезических рядов наблюдений, а также поиск доминирующих гармоник в сигналах;
3. Сопоставление результатов измерения вертикальных движений земной поверхности, полученных спутниковыми и наземными методами в окрестности единого пункта измерения;
4. Развитие ранее разработанной Кузьминым Ю.О. технологии для выявления доминирующего типа аномалий вертикальных смещений в разломной зоне;
5. Определение главных осей сжатия и растяжения во времени по данным измерений вдоль светодальномерных линий методом теории деформаций.

Результаты и их научная новизна

В диссертационной работе предлагается подход для анализа и интерпретации результатов геодеформационных процессов, полученных методами наземной и спутниковой геодезии, заключающийся в проведении поэтапного спектрально-временного анализа рядов непрерывных и повторных наблюдений и оценке уровня и характера современного геодинамического состояния недр. Представлена методология статистического анализа первичных данных на примере непрерывных инклинометрических наблюдений, который можно распространить и на дискретные измерения.

Статистический анализ многолетних повторных геодезических наблюдений позволил уточнить среднегодовую скорость геодеформационных процессов на Ашхабадском и Камчатском геодинамическом полигоне и более обоснованно показать, что региональный фон среднегодовых скоростей деформаций крайне низок (менее $2-3 \cdot 10^{-8}$ в год) для данных регионов с высокой сейсмической активностью.

С помощью спектрального анализа проанализированы результаты геодезических и геофизических измерений для поиска схожих и отличных друг от друга закономерностей в пределах и вне разломных зон.

Исследована возможность и предложен вариант применения теории деформаций для данных повторных наземных геодезических измерений, с целью идентификации доминирующих типов аномалий вертикальных смещений в разломных зонах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Применение поэтапного спектрально-временного анализа длительных рядов наблюдений позволяет уточнять величины региональных кинематических характеристик движений и, в частности, значения среднегодовых скоростей относительных деформаций на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах, а также выявлять доминирующие гармоники аномальных наклонов на добывающих платформах шельфовых месторождений.

2. Повторные ГНСС-наблюдения на циклически деформируемых объектах имеют меньшую метрологическую обеспеченность по сравнению с результатами, полученными методом постоянно действующих ГНСС измерений, обработанными с использованием методов спектрально-временного анализа.

3. Доминирующие типы аномалий движений в разломных зонах более достоверно выявляются при использовании теории деформации, которая также позволяет получать адекватную оценку степени влияния различных источников воздействия (вулканы и/или зона субдукции) на деформации земной поверхности в пределах Камчатского геодинамического полигона.

Теоретическая и практическая значимость работы

Улучшение методов анализа пространственно-временных геодеформационных процессов в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах, состоящее в последовательном применении методов спектрально-временного анализа и теории деформаций, позволяет более эффективно оценивать текущую геодинамическую обстановку, и, в свою очередь, напрямую влияет на геотехническую безопасность зданий, сооружений и объектов инфраструктуры месторождений полезных ископаемых.

Применение детального статистического анализа в исходных данных дает возможность на ранних этапах анализа отделять полезный сигнал от помех, что в свою очередь влияет на конечный результат. Выделение периодичностей позволяет оценить, с какой частотой те или иные процессы повторяются, а также сравнивать длительные ряды измерений друг с другом.

Сравнение различных геодезических методов (спутниковых и наземных) регистрации смещений земной поверхности позволяет повысить достоверность оценок регистрационных возможностей геодеформационных процессов, что в свою очередь влияет на точность и однозначность получаемых результатов.

В работе продемонстрировано практическое применение теории деформации для оценки главных осей сжатия и растяжения по светодальномерным линиям, а также влияние различных источников геодинамического воздействия на Камчатский геодинамический полигон.

Предложенный параметр F позволяет проводить селекцию типов аномальных вертикальных движений земной поверхности в зонах разломов по данным повторных измерений и устанавливать доминирующий тип аномалий за весь период наблюдений для каждого разлома.

Разработанные научно-методические подходы доведены до такого уровня унификации, что их можно напрямую использовать на других геодинамических полигонах.

Личный вклад автора

В ходе написания данной работы диссертант лично:

1. Выполнил обзор публикаций по тематике исследований диссертационной работы.
2. Разработал, адаптировал и применил необходимые алгоритмы для обработки

исходных геофизических и геодезических данных.

3. Проводил построение и расчет главных осей сжатия и растяжения во времени на Камчатском и в Ашхабадском геодинамическом полигоне.

4. Совместно с научным руководителем Ю.О. Кузьминым разработал параметр F , для селекции аномалий движений в разломной зоне.

5. Анализировал полученные результаты и формулировал основные выводы.

6. Формировал графическое представление окончательных результатов.

Апробация работы и публикации

Основные результаты исследований были представлены на 23 Международных и Всероссийских конференциях, а также семинарах и совещаниях.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в 14 научных работах, 13 из которых в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680444 [Приложение 1] и АКТ о внедрении результатов диссертационных исследований [Приложение 2].

Структура и объем работы

Общий объем диссертационной работы составляет 159 страниц машинописного текста, включая: введение, 4 содержательных главы, заключение, список используемой литературы из 329 библиографических наименования, а также 56 рисунков 8 таблиц и 2 приложения.

Благодарности

Автор искренне выражает свою глубокую благодарность научному руководителю - д.ф.-м.н., профессору Кузьмину Юрию Олеговичу за постановку научной задачи, бесконечную и безграничную поддержку при написании данной работы.

Магуськину Мефодию Антоновичу (ИВиС ДВО РАН) и Бахтиярову Вилорию Фаритовичу (КФУ) за предоставленные исходные данные светодальномерных измерений на Камчатке. Изюмову Сергею Федоровичу (Институт сейсмологии и физики атмосферы АН Туркменистана) за предоставленные материалы и совместную работу по Ашхабадскому геодинамическому полигону. Гатиятуллину Рамилю Накиповичу за предоставленные материалы и совместную работу по геодинамическому полигону на месторождении сверхвязких нефтей ПАО «ТАТНЕФТЬ», Квятковской Светлане Сергеевне за предоставленные материалы и совместную работу по геодинамическим полигонам на подземных хранилищах газа ПАО «Газпром». Сидорину Александру Яковлевичу (ИФЗ РАН) за ценные советы при написании одного из разделов, Никонову Александру Ивановичу (ИПНГ РАН) за ценные указания по использованию информации в области нефтегазовой геологии и разработки месторождений УВ. Коллегам по лаборатории «Современной и прикладной геодинамики» ИФЗ РАН Дещеревскому Алексею Владимировичу за погружение автора в мир обработки геофизических данных, а также ценные советы при написании данной работы, Жукову Виталию Семеновичу, Цуркису Илье Яковлевичу, Широкову Игорю Александровичу и Кузьмину Дмитрию Кузьмичу за ценные консультации и всестороннюю поддержку. Завьялову Алексею Дмитриевичу (ИФЗ РАН), Морозову Юрию Алексеевичу (ИФЗ РАН), Смирнову Владимиру Борисовичу (МГУ, ИФЗ РАН), Погорелову Виталию Викторовичу за ценные советы, способствовавшие улучшению диссертации.

Особо автор благодарит своих родных Барыльченко Валентину Петровну, Глинчикова Владимира Анатольевича, Фаттахову Людмилу Алексеевну и Калугину Дарью Сергеевну за непрерывную поддержку и мотивацию.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение.

Изучение современных геодформационных процессов во времени в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах в рамках современной геодинамики, то есть в реальном масштабе времени, имеет очень важное научное и прикладное значение, так как благодаря этому возможно оценивать текущее современное геодинамическое состояние недр. С течением времени появляются все больше геодинамических полигонов, где становится возможным накапливать временные ряды наблюдений используя повторные геодезические (наземные и спутниковые), геофизические и другие методы мониторинговых измерений. Учитывая принцип рациональной пространственно-временной детальности измерений, а также улучшение аппаратной базы, стало возможным эффективно и детально оценивать пространственно-временные масштабы процессов и не допускать исследование локальных объектов региональными системами наблюдений, а быстропротекающие процессы измерять с очень редкой частотой опроса. В свою очередь, развитие специализированного программного обеспечения для статистического анализа дискретных и перманентных данных позволяет уточнять ранее полученные результаты, улучшать информативность исходных данных, а также получать результаты строгими математическими методами.

Диссертация построена следующим образом:

В первой главе сделан обзор ранее опубликованных работ, чтобы оценить то, что уже было сделано и чего не хватает для анализа длительных рядов геодформационных наблюдений. Во второй главе проведен спектрально-временного анализ временной структуры длительных рядов наблюдений (некоторые из которых превышают 55 лет измерений) на Ашхабадском и Камчатском геодинамических полигонах. В конце главы представлены результаты применения спектрально-временного анализа на более коротких перманентных рядах измерений, на уникальном по своей сути геодинамическом мониторинге, на добывающих платформах в Северном Каспии. В третьей главе показаны особенности методов анализа дискретных и перманентных измерений на зональных циклических деформируемых объектах (подземные хранилища газа и месторождение, где добыча нефти производится путем парогравитационного дренажа). В четвертой главе показано применение геометрической теории деформации для анализа локальных измерений (например, в разломных зонах).

Таким образом, геодформационные наблюдения проанализированы на разных пространственных масштабах – региональном, зональном и локальном.

Глава 1. Состояние изученности проблемы

1.1 Основные результаты геодформационных наблюдений, полученные на геодинамических полигонах различного целевого назначения

Одной из актуальных задач на геодинамических полигонах является исследование современных геодформационных процессов с помощью комплексирования различных методов наблюдений и интерпретации. Учитывая, что любое исследование необходимо начинать с обзора ранее опубликованных работ для оценки текущей изученности проблемы, были проанализированы результаты геодформационных наблюдений на сеймопрогностических и техногенных погонах России, а также бывшего Советского Союза, а именно на: Алмаатинском» (Казахстан), «Ашхабадском» (Туркменистан), «Байкальском» (Россия), «Гармском» (Таджикистан), «Камчатском» (Россия), «Северо-Кавказском» (Россия), «Уральском» (Россия). Также необходимо было учитывать нефтегазовые полигоны, где в Советское время под руководством Миннефтепрома СССР, а в Российское время под контролем Ростехнадзора проведено множество геодезических измерений и получен огромный материал по современным горизонтальным и

вертикальным движениям не только в сейсмоактивных, но и в асейсмичных регионах. Для полноты обзора были просмотрены и изучены материалы на зарубежных геодинамических полигонах в Калифорнии (США), Японии, Китае.

1.2 Обзор методов измерений и анализа длительных рядов инструментальных геодеформационных наблюдений

В разделе показана эволюция развития методов геодеформационных измерений, в зависимости от преобладания научных парадигм. Например, в период преобладания концепции фиксизма, происходило развитие методов измерения вертикальных смещений. Были созданы сотни и тысячи километров линий Государственной сети нивелирования. По прошествии лет концепция фиксизма сменилась на концепцию мобилизма, что в свою очередь побудило развивать методы измерения горизонтальных смещений земной коры (триангуляция, светодальнометрия, трилатерация). Для того, чтобы обеспечить пространственный охват территории, развитие получили такие методы измерения горизонтальной и вертикальной компоненты, как ГНСС-измерения и спутниковая радарная интерферометрия.

Выводы главы 1. Объем экспериментальных данных СДКЗ, накопленных с середины 20 века, достаточно велик, однако научно-методические основы для анализа геодеформационных наблюдений все еще требуют усовершенствования и приведения в единый формализованный формат анализа получаемых результатов. Из приведенного обзора становится видно, что:

1. При анализе современных движений земной поверхности, измеренных разными методами (геометрическое нивелирование, ГНСС, наклонометры, деформометры и т.д.) многие авторы используют только кинематический анализ. Такой анализ проводится в рамках принятой парадигмы геодеформационных наблюдений и позволяет формально определять вектора скоростей. Однако такие результаты не могут быть достаточно полными и надежными без устранения различных дефектов первичных данных, глубокого статистического анализа временной структуры рядов измерений и выбора методов обработки, наиболее адекватных свойствам реальных сигналов. Для устранения этих недостатков необходимо разработать системный подход к обработке длительных геофизических рядов геодинамического мониторинга с использованием специализированного программного софта.

2. В последнее время прослеживается тенденция, что при изучении смещений земной поверхности на эксплуатируемых объектах нефтегазового комплекса, где характеристики данных объектов хорошо изучены, отдают предпочтение именно спутниковым методам измерений. Однако, как того требует «Инструкция по производству маркшейдерских работ», закладывать репера для постоянно действующих ГНСС станций в разломных зонах через 100 метров – практически невыполнимая задача из-за высокой стоимости и трудоемкости работ. Поэтому измерения проводят повторными ГНСС измерениями в режиме быстрой статики с интервалами повторения от полугода и более. В этой связи необходимо провести сопоставительный анализ результатов повторных наземных и спутниковых измерений на ПХГ и нефтегазовых месторождениях, нацеленный на фиксирование процессов, не связанных с подготовкой и реализацией землетрясений.

3. Анализ наблюдений за вертикальными смещениями сводится к тривиальному определению поднятия/опускания земной поверхности, без определения механизма формирования аномалий, поэтому необходим формализованный подход для селекции типов подвижек на основе геометрической теории деформации, который позволит проводить скользящее осреднение сдвиговых и изгибовых подвижек вдоль нивелирных линий, пересекающих несколько разломных зон, с целью установления доминирующего типа аномалий за весь период наблюдений для каждого разлома.

Глава 2. Анализ временной структуры временных рядов геодинамических наблюдений

В данной главе речь идет о результатах длительных рядов наблюдений, которые получены в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах. В сейсмоактивных регионах России (Камчатский полуостров) и Туркменистана (Ашхабадская сейсмоактивная зона) проводились светодальномерные измерения, позволяющие получить горизонтальные смещения земной поверхности в зоне субдукции и коллизии двух плит, соответственно. Даже с учетом того, что геодинамические особенности этих районов отличны друг от друга, светодальномерные измерения позволяют оценивать среднегодовую скорость смещений и деформаций на границах тектонических плит. Представлен анализ временной структуры многолетних (более 50 лет) рядов высокоточных (ошибка измерений 1 мм/км) нивелирных наблюдений с интервалом повторения 1 мес. В зоне Ашхабадского (Передового) разлома Северного Копетдага предложен механизм формирования локальных приразломных аномалий вертикальных смещений земной поверхности.

В нефтегазоносных регионах в большинстве случаев используются геометрическое нивелирование или ГНСС наблюдения. Но есть уникальная система мониторинга, которая создана ПАО «ЛУКОЙЛ» на Северном Каспии, которая включает в себя инклинометрические наблюдения на добывающих платформах, которые могут быть использованы как наклонометры и фиксировать наклоны морского дна.

Все полученные ряды наблюдений были обработаны специализированным пакетом программ WinABD (разработанной в ИФЗ РАН), с целью выявления и устранения дефектов и помех, присущих геофизическим данным. Были проанализированы и удалены (при необходимости) помехи и дефекты связанные с различной частотой дискретизации сигнала, нестабильностью аппаратуры (при техобслуживании и/или замене блоков аппаратуры из-за не идентичности электронных компонентов в регистрируемом сигнале могут возникать сдвиги уровня и/или изменения масштаба), влияние экзогенных факторов на контролируемые параметры геофизической среды (сезонные и суточные колебания и др). Если дефектов достаточно много что, как показывает практика геофизических наблюдений весьма типичная ситуация, а их выявление и устранение производится формально, с недостаточной полнотой, то индуцированные ими эффекты могут катастрофически исказить результаты любой обработки. Это с большой вероятностью приведет к неверной интерпретации результатов мониторинга. Поэтому любой содержательный анализ данных мониторинга должен начинаться с системного выявления и устранения всех дефектов и помех, которые можно идентифицировать. Эта процедура является обязательным условием получения корректных результатов при геодинамическом мониторинге.

2.1. Сейсмоактивные регионы

2.1.1. Копетдагский сейсмоактивный регион

Уже более 55 лет назад в рамках Программы “Изучение современных движений земной коры на стационарных полигонах” по инициативе выдающегося отечественного геофизика Ю.Д. Буланже, а также силами Института физики Земли и атмосферы АН Туркменистана (в настоящее время Институт сейсмологии и физики атмосферы АН Туркменистана) был заложен один из самых крупных геодинамических полигонов в мировой практике - Ашхабадский, на котором исследуются современные геодинамические (геодеформационные) процессы в Копетдагском регионе. С 1964 года проводятся систематические нивелирные наблюдения на зональных (режимных) нивелирных участках. А с 1974 года были поставлены первые светодальномерные измерения на локальном геодинамическом полигоне «Гаудан».

Система светодальномерных наблюдений была построена таким образом, чтобы иметь одну линию (1532) ориентированную в субмеридиональном направлении, вторую

линию (3330) субширотную, пересекающую зону Передового разлома Копетдага и промежуточную линию 2450, которая параллельна зоне простирания разлома. Данная система позволяет контролировать динамику бортов разлома и процессы, происходящие в блоковой части [Кузьмин, 2013, 2021, 2023а; Изюмов, Кузьмин, 2014]. Название 3330 соответствует длине линии в метрах.

Измерения велись 2 раза в сутки, утром и вечером, затем высчитывалось среднее значение. Чтобы убрать пропуски, этот ряд был диссертантом усреднен помесечно. Таким образом, достигалось равномерное временное покрытие (рис. 1).

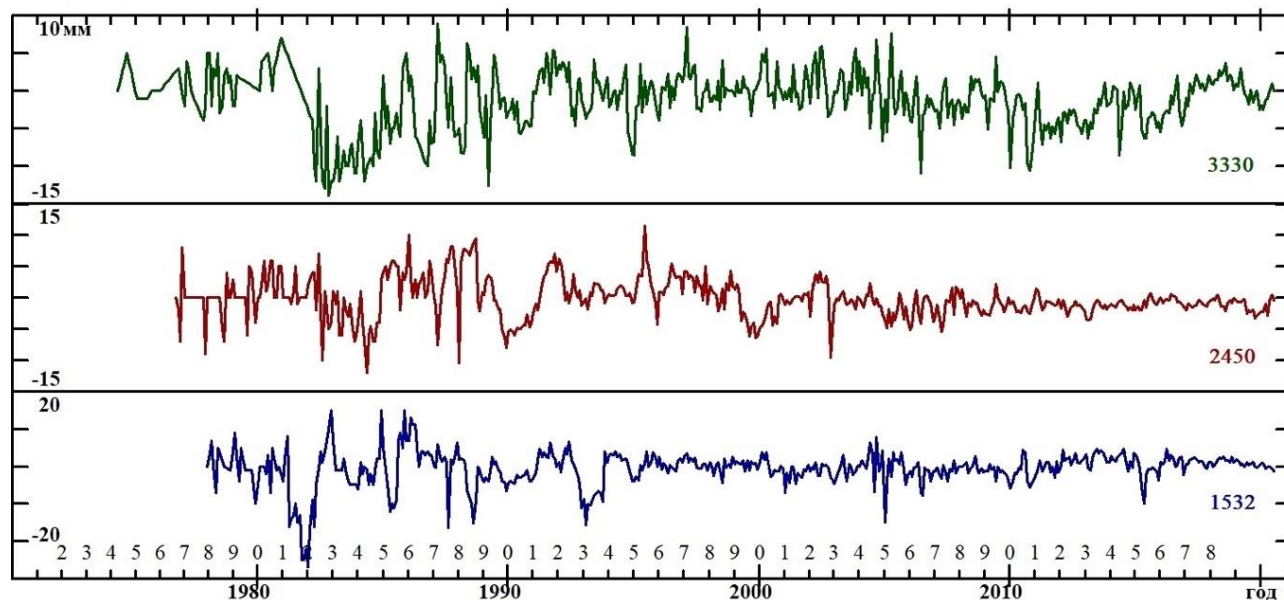


Рисунок 1. Смещения по светодальномерным линиям 3330, 2450 и 1532.

Светодальномерные измерения фиксируют горизонтальные смещения в окрестности разломной зоны. Из рисунка 1 следует, что кривые носят сложный знакопеременный характер. Видны периоды однонаправленных смещений как положительных (удлинение), так и отрицательных (укорочение). Стоит отметить, что по геологическим данным [Trifonov, 1978] скорость правостороннего сдвига должна быть на уровне 2 мм/год, что абсолютно опровергают геодезические данные [Изюмов, Кузьмин, 2010, 2014а; Кузьмин, 2013, 2017, 2019а].

Для выявления среднегодовой скорости смещений была проведена интервальная оценка скорости смещений за период линейного тренда внутри интервала по каждому ряду. Для этого, исходные ряды были очищены от сильных выбросов и других помех, которые связаны с деятельностью человека и никакого отношения к движению Земли не имеют.

Критерием выбора временного интервала служило временное поведение линии – а именно удлинение или укорочение за n-ный период времени. С помощью специализированных инструментов программы WinABD, разработанной в ИФЗ РАН [Дещеревский и др., 2016а, 2016б], светодальномерные линии были разделены на отдельные временные участки, по которым проводилась линейная аппроксимация. В конечном итоге, средние значения трендов смещений суммировались с учетом знака изменений длин линий, и полученная величина вычисленного смещения делилась на количество лет, для определения средней годовой скорости. По существу, это соответствует известной интегральной теореме о среднем, где интегрирование заменено суммированием [Кузьмин, Фаттахов, 2021].

В результате такого анализа было получено, что итоговые горизонтальные смещения по разлому за весь период наблюдений находятся в пределах 3,3 мм. Максимальная

среднегодовая скорость смещения равна $-0,07$ мм/год, а среднегодовая скорость деформации находится на уровне $-4,21 \cdot 10^{-8}$, что равняется двум амплитудам деформации земного прилива для данной широты местности. В итоге получается, что очень активный регион (очаговая зона катастрофического Ашхабадского землетрясения 1948 года), где повторные нивелирные наблюдения показывают, что в зоне разлома идут активные процессы с высокими амплитудами и скоростями относительных деформаций на уровне 10^{-5} год, а региональный фон скоростей деформаций крайне низок. При этом, оценки среднегодовых скоростей получены строгими статистическими методами за большой период наблюдений. Исследования же зарубежных авторов показывают, что по геологическим и GPS данным среднегодовая скорость смещения по этому разлому составляет от 10 до 16 мм в год [Allen at all, 2004; Vernant at all, 2004].

2.1.2. Камчатский регион

В 1979 году был организован светодальномерный мониторинг современных движений земной коры в районе Авачинского залива из обсерватории «Мишенная» [Левин и др. 2004, 2014].

Мониторинг проводился с 1979 г. по 2003 г. по 10 направлениям. Своевременно вводились необходимые поправки за температуру и давление. Измерения проводились с частотой опроса несколько раз в месяц, но из-за нестабильности покрытия ряда, данные были усреднены помесечно.

Обсерватория с источником излучения находится на сопке Мишенная, а 10 светодальномерных отражателей расположены возле пика Острый, Авачинский и рядом с предполагаемой границей континентальной и океанической плит. В зависимости от задач, отражатели были расположены в прибрежной зоне, возле вулканов, а один отражатель был удален от зоны субдукции на 50 километров.

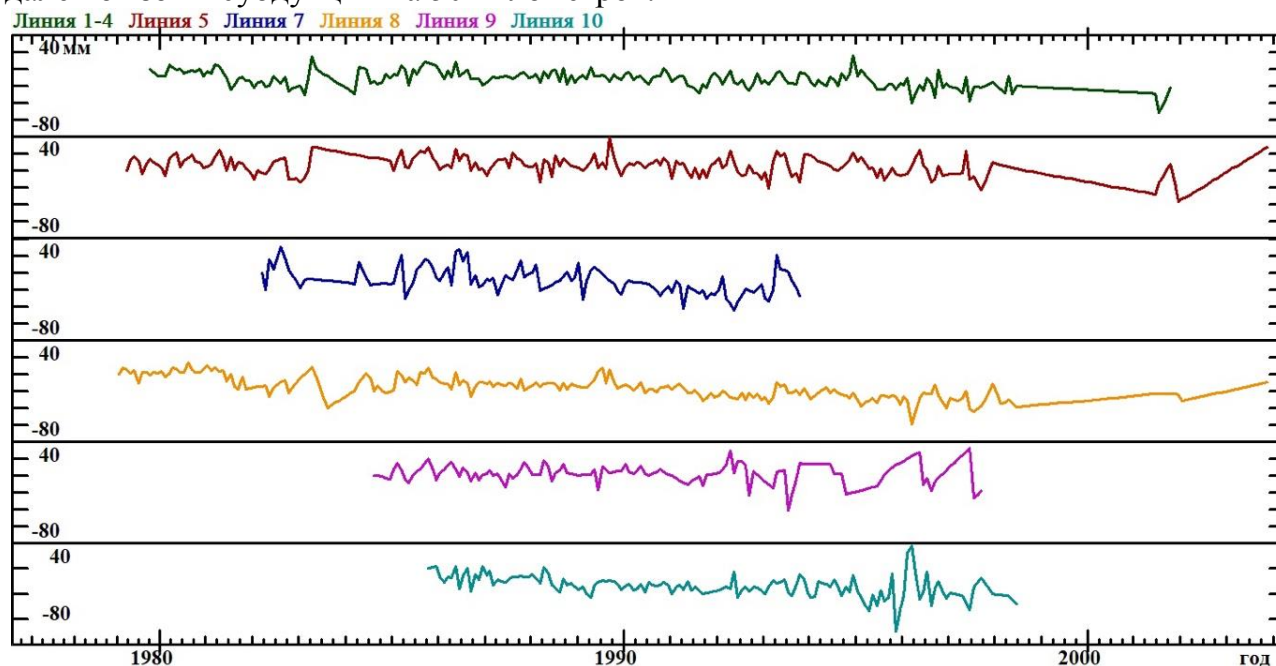


Рисунок 2. Модифицированные ряды светодальномерных линий.

Многолетний опыт использования светодальномерных измерений показал, что при длинах линий до 30 км обеспечивается точность на уровне $5 \cdot 10^{-7}$. Скорости относительных горизонтальных деформаций в год изменяются в диапазоне от $5 \cdot 10^{-9}$ до $5 \cdot 10^{-8}$. Длины баз линий составляют от 7 (отражатель P10) до 50 км (отражатель P07). Средняя длина всех линий составляет 24 км.

На рис. 2 показаны модифицированные ряды наблюдений на Камчатке. После тщательного анализа линий диссертантом было принято решение исключить линию 6 из

дальнейших расчётов, так как количество пропусков превышало 50%. При этом трансформации подверглись также линии 1 – 4. Выбранные отражатели установлены достаточно близко друг к другу, поэтому было решено данные по этим линиям усреднить путем медианного среднего.

Характеристика вычисленных линейных трендов приведена в табл. №1. Среднегодовая скорость смещения по разным линиям варьируется от -2,31 мм до -0,4 мм в год. При этом среднегодовая скорость деформации находится на уровне $10^{-7} - 10^{-8}$ в год.

Таблица № 1. Сводная информация по светодальномерным линиям

№	Начало измерений	Конец измерений	Линейный тренд, мм	L, км	Смещения, мм/год	Деформация в год
Линия 1-4	01.10.1979	01.10.2001	-17,39	20,47	-0,79	$-3,86 \cdot 10^{-08}$
Линия 5	01.04.1979	01.11.2003	-12,30	22,38	-0,50	$-2,24 \cdot 10^{-08}$
Линия 7	01.03.1982	01.08.1993	-25,34	49,70	-2,22	$-4,46 \cdot 10^{-08}$
Линия 8	01.02.1979	01.11.2003	-40,47	17,76	-1,64	$-9,21 \cdot 10^{-08}$
Линия 9	01.08.1984	01.07.1997	-5,12	33,53	-0,40	$-1,18 \cdot 10^{-08}$
Линия 10	01.10.1985	01.06.1998	-29,24	7,4	-2,31	$-3,09 \cdot 10^{-07}$

Если учесть, что амплитуда земного прилива волны M_2 для широты Камчатки составляет примерно $3 \cdot 10^{-8}$, то получается, что среднегодовая скорость деформаций в таком сейсмоактивном регионе соизмерима с амплитудой земного прилива. При этом среднегодовые скорости деформаций, полученные по данным повторного нивелирования с повышенной пространственно-временной детальностью в окрестностях г. Петропавловск-Камчатский в зонах разломов, указывают на высокий уровень скоростей локальных деформаций, достигающих 10^{-4} в год [Кузьмин Ю.О., Чуриков, 1998; Churikov V.A., Kuzmin, 1998].

2.1.3. Сопоставительный анализ временной структуры горизонтальных смещений полученных в Ашхабадской и Камчатской сейсмоактивных зонах

С точки зрения геодинамики представляет интерес сопоставление периодичностей горизонтальных деформаций, измеренных на Камчатском и Ашхабадском полигонах. Целью сопоставления был поиск общих закономерностей и периодов в субмеридиональном и субширотном направлениях. Если предположить, что обнаруженные периодичности – это единый геодинамический процесс, то должны быть единые причины сезонного характера, которые являются общими для атмосферы и могут одинаково отразиться в светодальномерных наблюдениях в Копетдаге и на Камчатке. Для этого, результаты периодограммного анализа были сопоставлены друг с другом в направлении север-юг (Ашхабад линия 1532 и Камчатка линия 1-4) и восток-запад (Ашхабад линия 3330 и Камчатка линия 9).

На рис. 3 представлены периодограммы деформаций вдоль этих линий. Видно, что однозначно совпадающих периодов практически нет. Если в субширотном направлении для Камчатки (линия 9) достаточно хорошо выделяется период 12 месяцев, что показывает явный сезонный ход деформаций, то в Ашхабаде годового периода не видно. На двух других светодальномерных линиях Ашхабадского полигона (1532 и 2450) годовая периодичность также отсутствует. Более детальный анализ спектров показывает, что амплитуда годового хода деформаций не превышает 1.5 мм/км при длине линий 1.5-3.3 км. Это довольно нетривиальный результат, поскольку локальные методы измерения деформаций, как правило, показывают наличие наблюдаемых сезонных эффектов. Вместе с тем, в вариациях деформаций на линиях 3330 и 2450 выделяется довольно устойчивый период 10 месяцев. Природа этого колебания пока не до конца понятна, но вполне

возможно, что этот феномен связан с климатическими эффектами изменения коэффициента прозрачности атмосферы.

Как видно из рисунка 3, по субмеридианальному направлению в Ашхабаде выявляется период в 13 месяцев (линия 1532), обусловленный региональными климатическими особенностями. На Камчатке, из-за высокой циклонической активности, которая сильно искажает атмосферные условия прохождения лазерного луча, фиксируется много периодов, которые трудно адекватно идентифицировать.

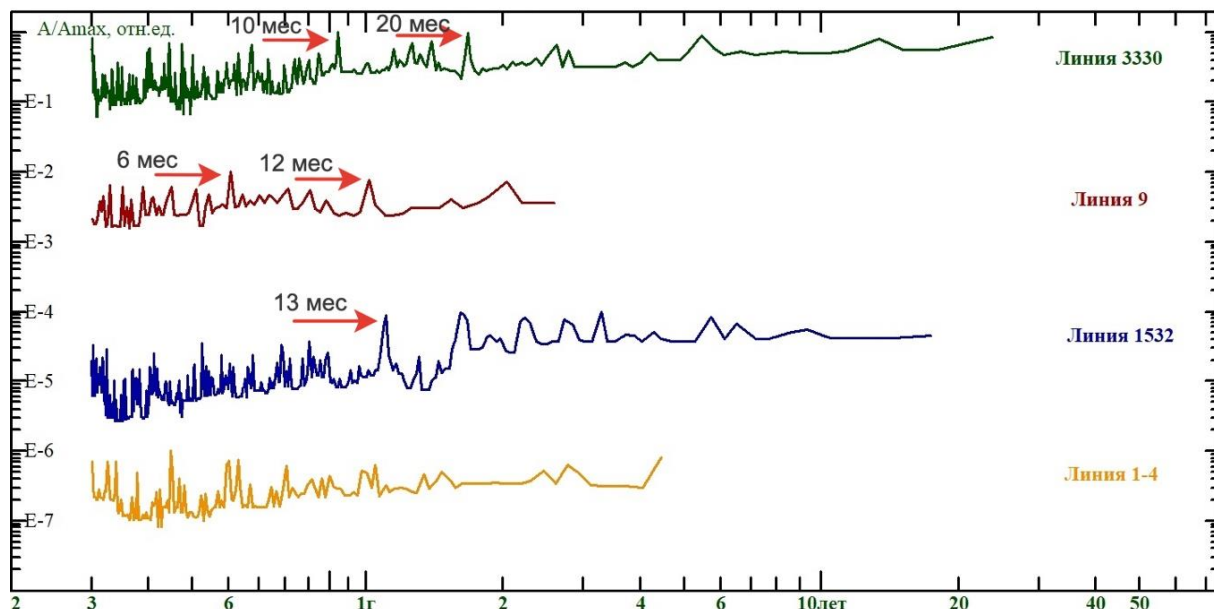


Рисунок 3. Сравнение периодограмм в Ашхабаде (линия 3330 и 1532) и на Камчатке (линия 9 и 1-4) в субширотном и субмеридиональном направлении

Таким образом, очевидно, что практически нет совпадающих глобальных периодичностей. А в этом случае можно предположить, что среднегодовые скорости деформаций земной поверхности, которые определены по трендовому анализу, являются именно региональными характеристиками геодинамического процесса.

2.1.4 Результаты анализа повторных нивелирных наблюдений в Копетдагском сейсмоактивном регионе

Территорию Ашхабадского геодинамического полигона пересекают несколько протяженных активных разломных зон. Создана зональная система геодинамических наблюдений, представленная 5-ю приразломными нивелирными профилями, ориентированными субмеридионально, пересекающими Северо-Ашхабадский разлом и в 4-х местах Ашхабадский (Передовой) разлом Копетдага. Плотность реперов в расчете на 1 км составила от 1.2 до 1.7 репер/км. Периодичность наблюдений достигает 12 раз в год для участков Овадан-Тепе и Гаудан и 6 раз в год для участков Секиз-Яб, Чули и Куру-Хаудан.

Так как данная система нивелирных наблюдений представляет собой 4 «длиннобазисных накломера», то можно фиксировать изменения во времени наклонов земной поверхности в окрестности этих разломов. Для этого используется определение наклона как горизонтального градиента вертикальных смещений земной поверхности. Среднегодовые скорости наклонов за период наблюдений [Кузьмин, Фаттахов, 2021] оказались равны: $3 \cdot 10^{-8}$ /год (Секиз-Яб); $2 \cdot 10^{-8}$ /год (Чули); $2 \cdot 10^{-8}$ /год (Гаудан); 10^{-8} /год (Куру-Хаудан). Тем самым, средняя скорость наклона в пределах Ашхабадского разлома имеет величину $2.5 \cdot 10^{-8}$ /год. Помимо этого, были оценены скорости надвига Копетдага по четырем профилям, пересекающим зону Ашхабадского разлома. Для этого необходимо умножить скорость наклона на длину соответствующего профиля L. Тогда скорости

вертикальных смещений по разлому будут равны: 0.14 мм/год (Секиз-Яб); 0.04 мм/год (Чули); 0.1 мм/год (Гаудан); 0.01 мм/год (Куру-Хаудан). Средняя скорость вертикальных смещений (надвига Копетдага) по Ашхабадскому разлому Копетдага равна 0.07 мм/год [Кузьмин, 2021; Кузьмин, Фаттахов, 2021].

Для более детального анализа соотношения региональных и локальных процессов на Ашхабадском разломе Копетдага была организована локальная деформационная площадка «Гаудан». Она представляет собой нивелирный профиль, состоящий из двух секций, одна из которых (1931–А) расположена непосредственно в зоне разлома (“приразломная”), а другая (“блоковая”) в бортовой части (1931–1932) и светодальномерные линии, одна из которых пересекает разломную зону (3330), а другая находится в бортовой (1532) части [Кузьмин, 2009, 2013, 2021а; Изюмов, Кузьмин, 2014].

В результате анализа было выявлено, что практически полностью отсутствуют трендовые изменения в “блоковой” части, тогда как в зоне разлома имеют место интенсивные знакопеременные процессы со своей временной структурой. При этом, на фоне практического отсутствия тренда имеют место знакопеременные вариации движений, которые достигают скоростей порядка $5 \cdot 10^{-7}$ /год для “блоковой” части и 10^{-5} /год для зоны разлома. Отсюда следует, что локальные деформации в разломной зоне происходят в условиях квазистатической (фоновой) нагрузки. Зона разлома проявляет себя автономно, поскольку длительности аномальных периодов деформаций в блоке и разломе не совпадают.

A/A_{\max} , отн. ед.

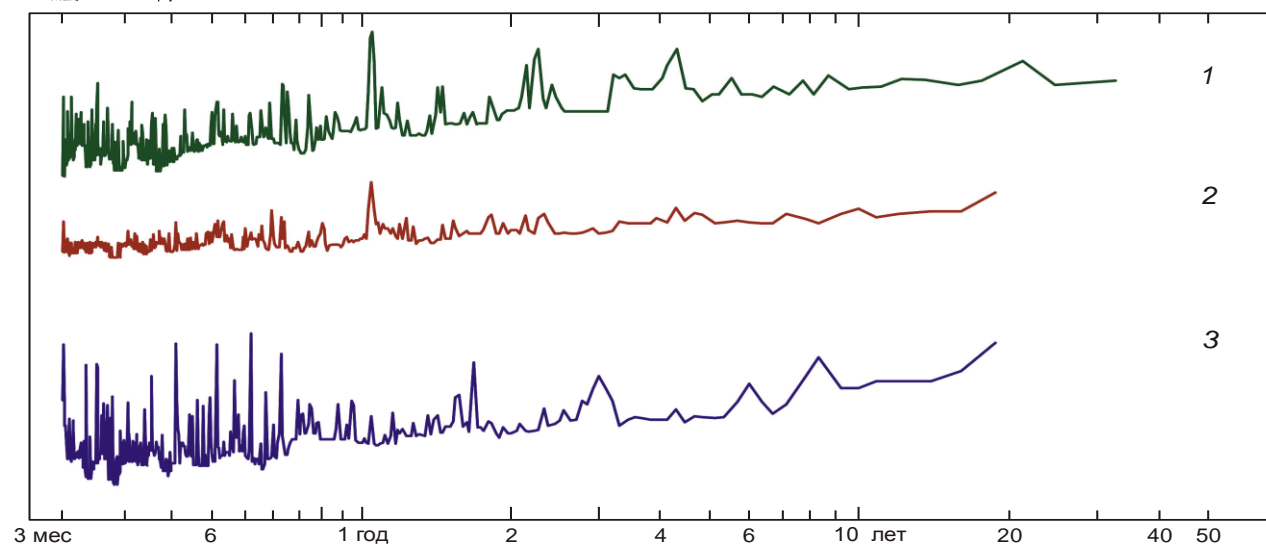


Рисунок 4. Периодограммы результатов нивелирования вдоль профиля Гаудан для различных секций: 1 – для всего профиля; 2 – для “блоковой” секции; 3 – для разломной секции

Для установления детальной временной структуры временных рядов длительных нивелирных наблюдений был проведен спектрально-временной анализ полученных данных (рис. 4). Показаны результаты периодограммного анализа для результатов нивелирования вдоль всего профиля Гаудан и отдельно вдоль “блоковой” секции и в пределах локальной разломной секции этого профиля. Для того, чтобы исключить “масштабный” эффект, вертикальные смещения реперов были переведены в относительные величины деформаций путем деления на длину соответствующих профилей. Как следует из рис. 4, результаты нивелирования по “блоковой” секции и данные по всему профилю Гаудан показывают наличие доминирующей сезонной (годовой) компоненты в спектре вертикальных движений. Периодограмма же, полученная по данным нивелирования разломной секции, кардинально отличается: в ней практически отсутствует доминирование годовой гармоники, и наиболее яркие гармоники проявляют

себя в области более коротких периодов. Этот факт является дополнительным аргументом в пользу автономного проявления аномальных деформаций в зоне разлома [Кузьмин, Фаттахов, 2021].

Необходимо заметить, что за все время инструментальных наблюдений в пределах измерительной сети Ашхабадского геодинамического полигона не происходили сильные землетрясения. Отдельные сейсмические события с $M \leq 6$ происходили, но они не вызывали трендовых изменений в рядах наблюдений; аномальные деформации, вызванные процессами подготовки этих землетрясений, как правило, носили локальный во времени характер, и после реализации сейсмических событий временной ход деформаций восстанавливался на фоновом уровне [Кузьмин, 1989; 2019а; Кузьмин, Фаттахов, 2021].

2.2. Нефтегазоносные регионы

2.2.1. Схема сбора и обработки наблюдений на месторождениях им. Ю. Корчагина и им. В. Филановского

В данном разделе представлен анализ инклинометрических данных на месторождении им. Ю. Корчагина и им. В. Филановского.

Первичный анализ поступающих данных инклинометрических наблюдений на месторождении им. В. Филановского показал наличие в них большого количества различных дефектов, что не удивительно в таких условиях наблюдений. Для очистки рядов от бракованных наблюдений использовались специализированные инструменты программы WinABD. С этой целью была реализована двухуровневая схема загрузки данных в базу. Сначала данные загружаются во вспомогательную базу данных в формате WinABD, что позволяет применять для их обработки весь функционал программы. Итоговый алгоритм предварительной фильтрации данных включает следующие операции:

1. Удаляются (заменяются пропусками) выбросы исключительной амплитуды, заведомо превышающие динамический диапазон прибора.
2. Удаляются (заменяются пропусками) серии констант длительностью более 10с. Такие серии, насчитывающие более 800 первичных отсчетов, практически никогда не встречаются при нормальной работе системы регистрации, и свидетельствуют об отсутствии сигнала.
3. Оценивается скользящая медиана в окне шириной 6с (480 измерений).
4. Производится итеративная фильтрация выбросов, при этом под выбросами понимаются значения данных, отклоняющиеся от текущей медианы более, чем на некоторую критическую величину.
5. Поиск и устранение сдвигов уровня выполняется экспертно (не алгоритмически).

После всех проведенных шагов обработки данные с частотой опроса 80 Гц усредняются до 1 отсчета в час, поскольку при анализе долговременных трендов более высокочастотная дискретизация не требуется. При усреднении учитывались только реально выполненные наблюдения (пропуски никак не интерполировались), что обеспечивает несмещенные оценки параметров.

На разработанный автоматизированный алгоритм было получено свидетельство о государственной регистрации для ЭВМ № 2022680444 [Приложение 1].

2.2.2. Анализ изменений наклонов на месторождении им. Ю. Корчагина и В. Филановского

Приборы, установленные на ЛСП-1 на мест. им. Ю. Корчагина показывают, что среднегодовая скорость по крену и дифференту (вычисленная по линейному тренду) составляет 0,002°/год. По крену хорошо прослеживаются синусоидальные изменения сигнала, указывающие на сезонный температурный ход.

Месторождение им. В. Филановского, открытое в 2005 году, является крупнейшим нефтяным месторождением в российском секторе Каспийского моря. Установленные комплексы платформ (Филановское – 1 и Филановское – 2) состоят из ЛСП-1, ПЖМ-1, РБ,

ЦТП, ЛСП-2 и ПЖМ-2. На всех платформах ведутся инклинометрические наблюдения. Так как добывающие платформы это ЛСП-1 и ЛСП-2, то результаты инклинометрических наблюдений представлены только по этим объектам.

Анализ данных показал, что временные ряды подвержены нерегулярным вариациям, иногда значительной амплитуды, а также сезонному ходу, который достаточно хорошо прослеживается. На некоторых кривых заметны также изменения уровня, что проявляется в разной величине наклона в одни и те же месяцы 2018, 2019, 2020 и 2021 г. Медленные нерегулярные изменения уровня обычно принято относить к трендовой компоненте сигнала. Правильная оценка их свойств, включая перспективную экстраполяцию, весьма важна при решении вопроса о том, насколько велики фактически наблюдаемые наклоны по сравнению с предельно допустимыми значениями и о возможном изменении их амплитуд с течением времени. Максимальные зафиксированные вариации наклонов на платформах (амплитуда) составляют от 0,034 до 0,065 градусов, а диапазон изменения линейного тренда варьируется в диапазоне от 0.001 град/год до 0.005 град/год.

По всем инклинометрическим рядам был проведен спектральный анализ методом наложенных эпох (периодограмм) (рис. 5). Для этого первоначально из рядов был удален тренд скользящим ядерным сглаживанием с окном шириной 6 мес. и гауссовой весовой функцией ядра, со схлопыванием окна на границах ряда (чтобы длина ряда при сглаживании не изменилась).

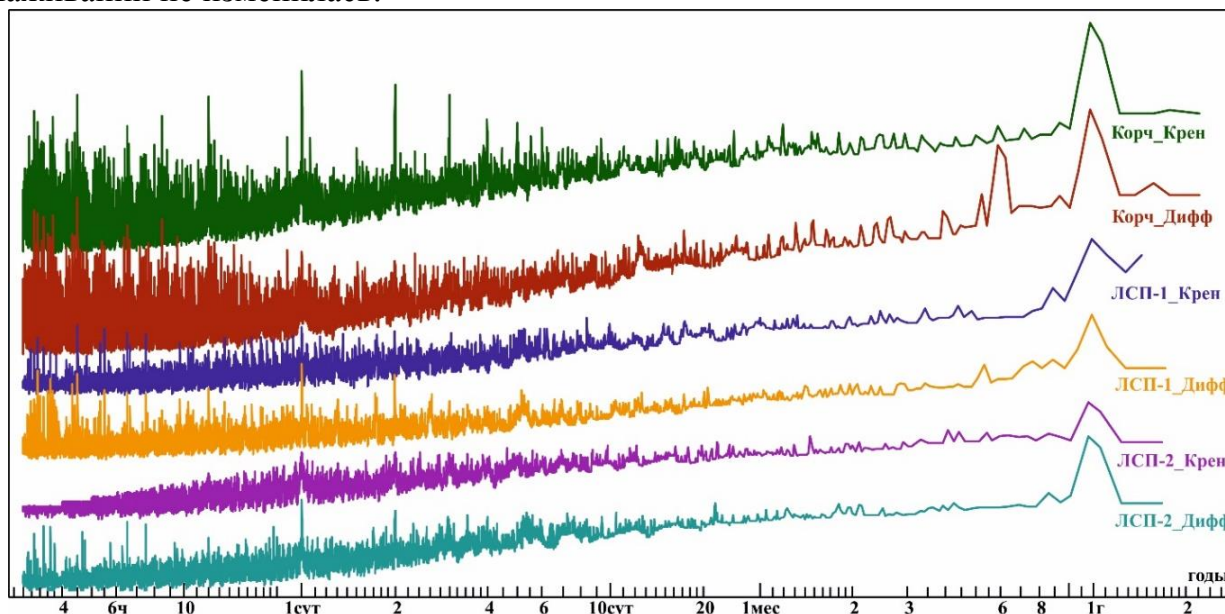


Рисунок 5. Периодограммы по кренам и дифферентам

В результате зафиксировано, что наиболее ярко выделяющиеся периоды по крену и дифференту – 1 год (сезонный ход). Помимо этого, в сигналах выделяется суточная гармоника. Также четко фиксируются эхо-максимумы на двойном, тройном и т.д. периодах (48ч, 72ч и т.д. для крена и 24ч для дифферента), возникающие вследствие неортогональности разложения.

Предварительный анализ литературных данных показывает, что суточная гармоника может быть связана с влиянием бризов и связанных с ними морских течений (т.н. негравитационный прилив) [Герман, 1970; Косарев, Цыганов, 1972; Медведев и др., 2017]. Кроме того, на меньших периодах определенное воздействие на платформы могут оказывать собственные колебания уровня моря как замкнутого водоема [Медведев и др., 2017]. Однако анализ спектров и периодограмм позволяет сделать вывод, что обнаруженные периодичности не совпадают с частотами собственных колебаний моря (сейш). В то же время детальный анализ формы экспериментально выделенных периодичностей по методике [Дещеревский, Сидорин, 1999] показывает, что

обнаруженные 6- и 8-часовая гармоника могут интерпретироваться как гиббсовские субгармоники основного колебания, возникающие вследствие резкого отличия его формы от синусоидальной.

Выводы главы 2. Проведенный детальный анализ длительных геодеформационных рядов наблюдений на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах, а также на добывающих платформах Северного Каспия с использованием пакета программ WinABD для обработки геофизических рядов наблюдений, позволил получить и уточнить ряд результатов:

1. Среднегодовая скорость деформирования земной поверхности с уточнением и аппроксимацией линейных участков по данным светодальномерных линий на Ашхабадском Передовом разломе составила $-4,21 \cdot 10^{-8}$, что в пересчете на среднегодовую скорость смещения составляет $-0,07$ мм/год, а на Камчатском геодинамическом полигоне по 10 светодальномерным линиям изменяется от 10^{-8} до 10^{-7} , что в пересчете на среднегодовую скорость смещения по различным линиям составляет от $-2,31$ до $-0,4$ мм в год. Данные результаты указывают на то, что региональный фон среднегодовых скоростей деформаций крайне низок для регионов с высокой сейсмической активностью.

2. Спектральный анализ светодальномерных данных методом периодограмм наложенных эпох позволил выделить различные периоды и провести сравнение двух регионов с разной геодинамической обстановкой. Схожих периодов, кроме сезонных периодичностей, выявить не удалось. Таким образом, среднегодовые скорости деформаций земной поверхности являются именно региональными характеристиками геодинамического процесса.

3. Спектральный анализ нивелирных наблюдений на Ашхабадском геодинамическом полигоне выявил два доминирующих фактора во временном ходе вертикальных смещений. Первый из них имеет сезонную природу и обусловлен термоупругими деформациями земной поверхности с периодом в 1 год. Второй фактор связан с влиянием вариаций выпадения атмосферных осадков, которые изменяют объемные модули флюидонасыщенной среды разломной зоны, что формирует локальные аномалии смещений в постоянном поле региональных напряжений. Это свидетельствует в пользу преобладания механизма параметрического возбуждения локальных процессов, когда квазистатические региональные напряжения совершают работу на индуцированных малыми изменениями внутренних параметров жесткости среды локальных перемещениях активизированных фрагментов разломной зоны. Комплексный анализ всей совокупности используемых данных показывает, что наблюдаемая временная структура деформационных процессов в зоне Ашхабадского разлома не вызвана напрямую динамикой регионального взаимодействия Туранской и Иранской микроплит, а обусловлена суперпозицией локальных деформационных процессов экзогенного и эндогенного происхождения.

4. Разработанная многоступенчатая методика обработки геофизических рядов на примере инклинометрических наблюдений позволила сформировать автоматизированный алгоритм первичной обработки данных. По результатам такого глубокого статистического анализа были рассчитаны среднегодовые скорости кренов и дифферентов платформ на месторождениях им. Ю. Корчагина и им. В. Филановского. Учитывая весь срок эксплуатации месторождений, полученные тренды на порядок меньше нормативно допустимых. Проведение спектрального анализа методом наложенных эпох позволило выделить ряд периодов, которые доминируют в сигналах, и полученные результаты были сравнены с предположением, что на платформы может воздействовать гравитационный прилив, регистрируемый на расположенных в пределах Северного Каспия мареографных станциях. Однако, среднегодовая амплитуда гармонических колебаний платформы с периодом волны M2 не превосходит 2 угловые секунды по крену и 0.5" по дифференту, а

это существенно меньше, чем регистрационные возможности приборов.

Таким образом, обосновывается **первое защищаемое положение:**

Применение поэтапного спектрально-временного анализа длительных рядов наблюдений позволяет уточнять величины региональных кинематических характеристик движений и, в частности, значения среднегодовых скоростей относительных деформаций на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах, а также выявлять доминирующие гармоники аномальных наклонов на добывающих платформах шельфовых месторождений.

Глава 3. Особенности методов анализа наблюдений на объектах, подверженных циклическому деформированию

3.1. Результаты анализа повторных нивелирных наблюдений на месторождении сверхвязких нефтей

Комплексный геодинамический полигон ПАО «ТАТНЕФТЬ» представляет собой совокупность региональных, зональных и локальных геодезических полигонов, дополненных развитой сетью сейсмических станций. К настоящему времени этот геодинамический полигон является уникальным, как по составу и детальности методов, так и по длительности его функционирования (около 30 лет). Аналогов подобных масштабных и детальных работ, как в нашей стране, так и за рубежом, в настоящее время не существует [Хисамов и др, 2012].

В период 2012-2018 гг. были получены результаты измерений деформаций земной поверхности с помощью дискретного геометрическое нивелирования и непрерывных спутниковых ГНСС измерений. Всего было выполнено 18 циклов наблюдений. Примечательно, что ГНСС измерения проводились путем организации квазинепрерывных, обсерваторских измерений. Учитывая, что методы спутниковой геодезии в режиме длительных непрерывных наблюдений достаточно редко используются в геодезической и маркшейдерской практике на нефтегазовых месторождениях, то проведен сопоставительный анализ наземных (нивелирных) и спутниковых геодезических наблюдений за вертикальной компонентой движений земной поверхности.

3.1.1 Описание геодинамического полигона

В данном разделе дана общая характеристика и месторасположение геодинамического полигона, описано какие измерения проводились, а также общее количество заложенных реперов.

3.1.2 Анализ результатов вертикальных движений по нивелирным профилям

В разделе проанализированы результаты нивелирных измерений по каждому профилю. Зафиксирован обширный изгиб вверх на профиле А-А и В-В, который обусловлен особенностями режима разработки данного месторождения, а именно технологией добычи углеводородов методом парогравитационного дренажа.

3.1.3 Анализ результатов ГНСС наблюдений

Для понимания внутренней структуры сигнала был проведен спектральный анализ, по результатам которого было зафиксировано, что на периодах до 1 мес. наблюдается повышенная дисперсия сигнала, которая свидетельствует о высокой “зашумленности” измеряемых параметров. Выбранные станции установлены на крышах зданий, а это означает, что техногенные помехи вносят большой вклад в измеряемые величины горизонтальных и вертикальных смещений. Наиболее общим для всех компонент измеренных смещений является наличие годичной составляющей, которая отчетливо видна на вертикальных смещениях всех трех пунктов. На пунктах № 3196 и № 3199 горизонтальные компоненты не выявляют однозначного присутствия годичной компоненты в спектре движений, что, скорее всего, связано с тем, что доминирующий

фактор, влияющий на показания ГНСС-измерений – это годовая тепловая деформация земной поверхности (разница температур зимы и лета), которая наиболее интенсивна именно в вертикальном направлении смещений.

Также рассчитаны среднегодовые скорости, путем выделения линейных трендов вертикальных смещений во времени.

3.1.4 Сопоставление результатов нивелирных и ГНСС измерений

Для проведения сопоставления были выбраны совмещенные ГНСС и нивелирные наблюдательные пункты. Это пункты ГНСС (ГЛОНАСС/GPS) №№ 3192, 3196, 3199, рядом с которыми размещены нивелирные реперы №№ 127, 2137, 1512 соответственно.

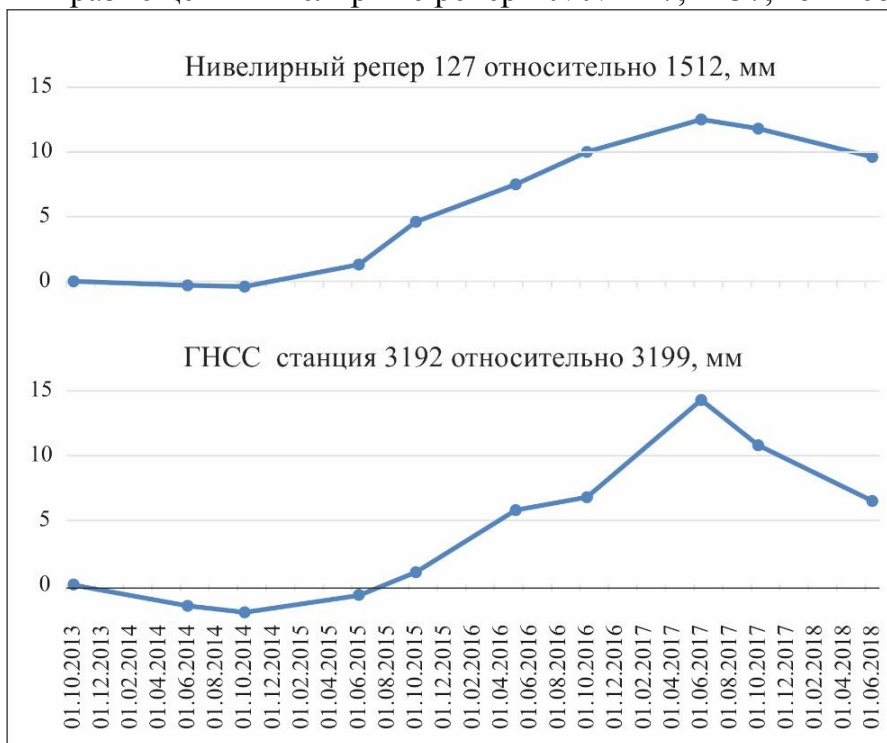


Рисунок 6. Временной ход превышений нивелирного репера 127, относительно репера 1512 и временной ход превышений пункта ГНСС 3192 относительно пункта ГНСС 3199

Для того чтобы сопоставлять идентичные параметры в одинаковые промежутки времени, были сформированы каталоги нивелирных превышений между реперами и “ГНСС-превышений” между пунктами. С учётом того, что частота опроса ГНСС-наблюдений гораздо выше, чем у нивелирных, данные спутниковых наблюдений выбирались за период, когда проводились нивелирные измерения. Поскольку в интервал времени проведения одного повторного цикла нивелирования укладываются десятки среднесуточных значений ГНСС, последние усреднялись с учетом средневзвешенных значений. На основе сформированных каталогов были построены графики временного хода превышений между наблюдательными пунктами по данным наземной и спутниковой геодезии. На рисунке 6 продемонстрирован один из таких сопоставительных графиков.

В целом, сравнивая все графики, можно констатировать, что тенденции временного хода вертикальных смещений земной поверхности по нивелирным и ГНСС данным совпадают. Однако, количественно имеются существенные различия.

3.2. Результаты анализа повторных геодеформационных наблюдений на подземных хранилищах газа

Анализ наземных и спутниковых наблюдений проводился по 2 ПХГ. Главные различие этих объектов заключаются в том, что Калужское ПХГ (расположенное на границе с Московской областью) создано в водоносном горизонте, а Степновское ПХГ (расположенное в Саратовской области) в выработанном нефтегазоконденсатном

месторождении. Всего было выполнено 4 цикла наблюдений, которые включали в себя проведение нивелирные измерения по всем пунктам наблюдений, а ГНСС измерения только в зонах разломов.

Ситуация с подземными хранилищами газа существенно отличается от газовых месторождений, где добыча сопровождается понижением пластового давления. Учет циклического воздействия на недра, целесообразно анализировать используя графики, где отображено поведение каждого цикла относительно предыдущего.

3.2.1 Анализ повторных маркшейдерско-геодезических наблюдений на ПХГ, созданном в водоносном горизонте

В результате анализа нивелирных данных на Калужском ПХГ, удалось детально проанализировать поведение вертикальных смещений земной поверхности во времени по каждому профилю. Были зафиксированы γ и S аномалии в зонах разломов. Отмечено, что увеличение пластового давления в период между закачкой газа в пласт и отбора на величину 1.5 – 2 МПа, приводит к поднятие земной поверхности в центральной части ПХГ с максимальной амплитудой в 5 мм.

Повторные ГНСС наблюдения, представленные в виде графического отображения направленных векторов, демонстрируют горизонтальное смещение земной поверхности от 5 до 30 мм с хаотичной направленностью.

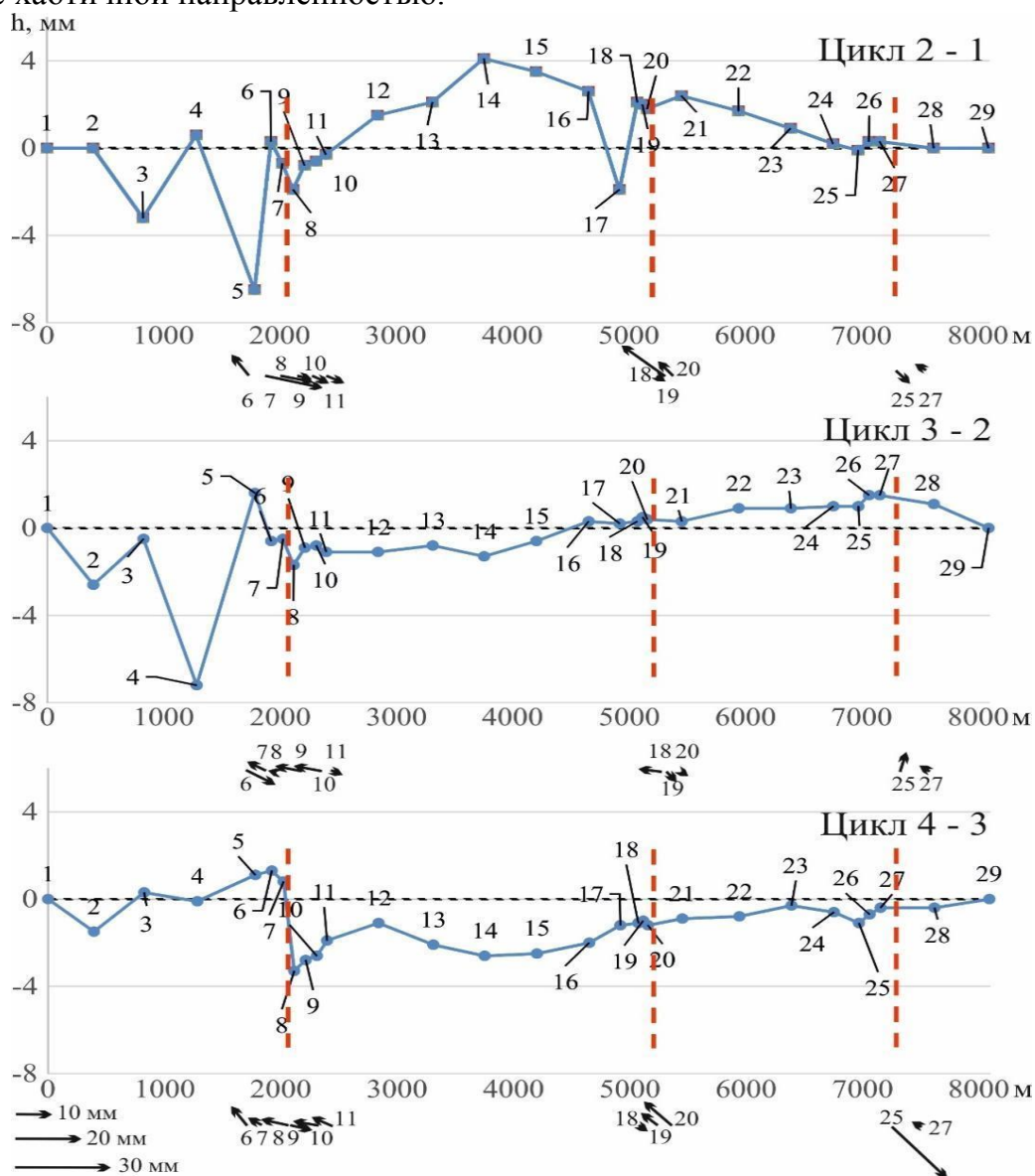


Рисунок 7. Соотношение вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности вдоль профиля 1-1 (вертикальная шкала в мм). Красные пунктирные линии – оси разломных зон. Величина стрелки означает амплитуду смещений.

Для того, чтобы провести сопоставительный анализ нивелирных данных с ГНСС измерениями, результаты ГНСС наблюдений редуцированы на направление профиля. Иными словами, вектора горизонтальных смещений в географической системе координат спроецированы на направление профиля (рис. 7).

Таким образом, вектора горизонтальных смещений оказываются строго ориентированы вдоль направления профиля. В результате, прямое сопоставление вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности показывает, что максимальные амплитуды вертикальных смещений оказались на порядок меньше, чем горизонтальных.

При этом хорошо известно, что при объемном деформировании вертикальные смещения земной поверхности (свободной от нагрузок) всегда превосходят горизонтальные, которые происходят в обстановке бокового стеснения. Общей направленности векторов ГНСС-измерений, как в пределах одного цикла, так и между циклами, не зафиксировано.

3.2.4 Анализ повторных маркшейдерско-геодезических наблюдений на ПХГ, созданном на базе истощенного месторождения

На Степновском ПХГ было проведено схожее исследование. Были проанализированы 3 профиля по 4 циклам наблюдений. Детальный анализ нивелирных данных показал, что на одной из разломных зон зафиксировано смещение земной поверхности с амплитудой 8 мм, а также прослеживается знакопеременный характер у аномалий. Одна разломная зона, из-за низкой интенсивности современной деформационной активности была отнесена к категории не опасных разломов. Накопленные амплитуды большинства смещений не превосходят по величине двукратную ошибку измерений.

Анализ горизонтальных смещений земной поверхности на ПХГ, показал, что на всех разломных зонах вектора горизонтальных смещений ориентированы разнонаправленно. Амплитуды горизонтальных смещений составляют величины порядка 8-10 мм. На некоторых локальных профилях имеют место аномальные горизонтальные смещения, достигающие 30 мм.

Сравнивая циклы измерений между собой, было замечено, что какой-либо зависимости в направленности или в величинах смещений нет, наблюдается хаотичная картина. Имеют место и знакопеременные смещения с амплитудами 20 – 30 мм. Практически не наблюдаются систематические горизонтальные смещения вдоль локальных профилей (вкрест разломов). Прямое сопоставление вертикальных и горизонтальных смещений земной поверхности показало, что величины аномальных горизонтальных смещений на порядок и более превосходят вертикальные. Как и на Калужском ПХГ, согласованность в направлении векторов минимальная, при том, что расстояние между реперами меньше 100 метров.

Выводы главы 3. Наличие трех постоянно действующих спутниковых ГНСС станций, расположенных рядом с нивелирными реперами, позволило сопоставить результаты вертикального движения земной поверхности, полученные методами спутниковой и наземной геодезии на месторождении сверхвязкой нефти. Зафиксировано количественное (по амплитуде) различие между смещениями по данными нивелирования и ГНСС от 4 до 13 мм. Однако в целом, результаты квазинепрерывных ГНСС измерений качественно совпадают с данными наземных нивелирных наблюдений и отражают деформации земной поверхности во времени, в отличие от повторных ГНСС измерений, реализованных на ПХГ.

Сравнительный анализ деформационных процессов на подземных хранилищах газа, построенных в различных геологических структурах, показал, что результаты мониторинга, проведенного в пределах ПХГ, организованного в водоносных горизонтах, отличаются от аномальных деформаций на ПХГ, созданных в истощенных залежах. В

первом случае наиболее контрастно проявляют себя поднятия и оседания земной поверхности территории всего ПХГ, обусловленные его эксплуатацией, а локальные, приразломные аномалии выражены более слабо. Во втором случае, когда при строительстве ПХГ используется истощенная залежь, деформационная активность разломных зон явно доминирует над общим поднятием и оседанием земной поверхности территории ПХГ.

В результате, обосновывается **второе защищаемое положение:**

Повторные ГНСС-наблюдения на циклически деформируемых объектах имеют меньшую метрологическую обеспеченность по сравнению с результатами, полученными методом постоянно действующих ГНСС измерений, обработанными с использованием методов спектрально-временного анализа.

Глава 4. Применение методов теории деформации для анализа повторных геодеформационных наблюдений

4.1. Анализ повторных нивелирных наблюдений в зонах разломов методами теории деформаций

Как было написано ранее, основу информации о пространственно-временной структуре современного геодинамического состояния среды составляют повторные геодезические (наземные и спутниковые) измерения, проводимые на различных масштабных уровнях описания процессов: глобальном, региональном, зональном и локальном. Обобщая полученную информацию, можно сказать, что существуют устойчивые типы локальных аномалий в вертикальных движениях земной поверхности в зонах разломов. При этом горизонтальные размеры (L) γ -аномалий составляют 0,1–2 км, S -аномалий – 5–10 км, а β -аномалий – 10–30 км. Соотношения между амплитудой (Δh) и протяженностью (L) для каждого типа аномалий связаны через масштабный коэффициент $m = 10^{-6}$ (если амплитуда выражена в миллиметрах, то ширина аномалии – в километрах). Приведенная классификация аномалий носит относительный характер и зависит, в частности, от пространственного масштаба (изученности) исходных данных. Вместе с тем, данная классификация представляется наиболее оптимальной, поскольку, каждый тип аномалии может быть отождествлен с конкретным механизмом деформирования.

Согласно выявленной классификации аномальных движений, необходима формализация регионального изгиба, локального изгиба и сдвига бортов разлома. Для определения типа деформирования земной поверхности по результатам повторного геометрического нивелирования для трех смежных реперов в работе [Сидоров, Кузьмин, 1989] предложено использовать безразмерные комбинации из параметров наклона α и изгиба (регионального (β) и локального (γ)). Если через одну из секций нивелирного хода проходит разлом, то соотношение величин α и β (γ) позволяет судить о степени однородности деформирования приразломной зоны.

Для количественной характеристики степени однородности деформирования Кузьминым Ю.О. был введен безразмерный параметр P на основе анализа по 3 нивелирным реперам [Сидоров, Кузьмин, 1989]. Каждому значению P соответствует вполне определенный тип деформирования. Так, при $P = -1$ имеет место чистый изгиб – аномалия типа $\beta(\gamma)$, что означает максимальное нарушение однородности деформирования. В случае, когда $P = 0$ возможно проявление неоднородности деформирования за счет возникновения S аномалии на разломе. Значению $P = +1$ соответствует однородный наклон, который «не замечает» разломную зону. Этот параметр удобно применять для изучения периодов нарушения однородности деформирования при проведении наблюдений на режимных приразломных участках за длительный период времени. Однако принципиально важно отметить, что высокая степень неоднородности (P

→ -1) может быть обусловлена как локальным проявлением сдвигов бортов разлома (S-аномалия), так и изгибом (β - и γ -аномалии) в окрестностях тектонического нарушения.

Для того, чтобы увеличить эффективность использования безразмерных параметров для типизации кинематических режимов современной динамики разломных зон предложен новый подход – схема из пяти реперов [Кузьмин, Фаттахов, 2018]. В качестве основных морфологических признаков сдвига и изгиба предложено использовать характер поведения вертикальных смещений непосредственно в зоне разлома. Для этой цели были использованы расчетные вертикальные смещения поверхности от моделей сдвиговых и раздвиговых разломов, которые описывают формирование локальных деформаций для S- и γ -аномалий, соответственно. Моделирование выполнено в рамках дислокационной модели сдвиговых разломов [Okada, 1985, 1992] и модели раздвиговых разломов [Кузьмин, 1999, 2018, 2019a, 2019b, 2021a, 2022], при которых формируются локальные оседания земной поверхности в окрестности разлома.

Для того, чтобы для пяти пунктов ввести параметры, аналогичные P и Q, необходимо рассмотреть суперпозицию трех левых и трех правых реперов. Для них следует найти средние значения наклона и изгиба, а затем вычесть их региональные (фоновые значения).

Параметр F изменяется в интервале $[-1; 1]$, где значению $F = -1$ соответствуют S-аномалии, значение $F = +1$ означает доминирование в зоне разлома $\beta(\gamma)$ -аномалии (региональный и локальный изгиб, соответственно). Таким образом, параметр F служит своеобразным фильтром, который производит селекцию типов аномалий, когда спектр наблюдаемых движений состоит из совокупности аномалий различных типов [Кузьмин, Фаттахов, 2018].

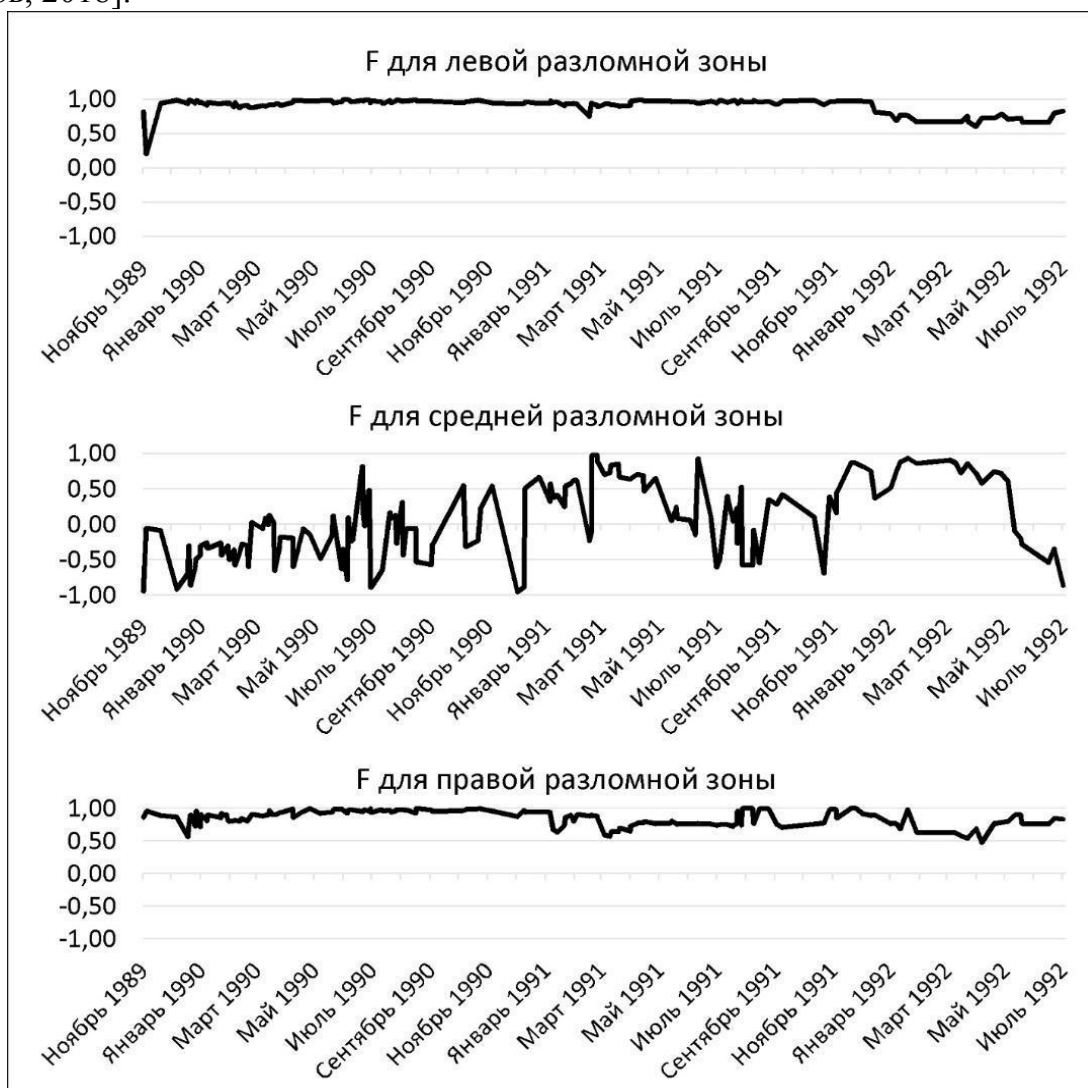


Рисунок 8. Временной ход параметра F для нескольких приразломных зон (Камчатка)

Пример реализации такого подхода показан на рисунке 8, когда в пределах разломной зоны было проведено 155 повторных циклов измерений. Стандартный подход анализа в виде построения графиков друг под другом будет проблематичен ввиду огромного количества графической информации.

Из рисунка 8 видно, что характер деформирования трех разломных зон в течение времени эволюционирует различным образом. Параметр F для левого и правого разлома на протяжении всего периода наблюдений устойчиво отмечает доминирование аномалии локального изгиба (тип γ). Исключение составляет период с декабря 1997 г. по апрель 1998 г., в течение которого произошла подготовка и реализация ощутимого Камчатского землетрясения с $M = 7,1$, которое произошло на расстоянии около 100 км от нивелирного профиля [Кузьмин, Чуриков, 1998].

Этот период характерен тем, что в зоне этих разломов к локальным изгибам (просадкам земной поверхности) добавляются и незначительные сдвиговые перемещения, которые изменяют значение параметра F с 0,95 до 0,5. Это означает, что в сложном приразломном движении, в котором всегда присутствует суперпозиция изгибов и сдвигов земной поверхности, деформация локального изгиба вначале превосходила сдвиговую почти в 40 раз, а в период подготовки землетрясения – всего в 3 раза. Совершенно иной характер имеет поведение деформационного процесса в средней разломной зоне. Там среднее значение параметра $F = -0,7$ отмечалось в течение всего первого года наблюдений. Затем в течение полугода знак параметра изменился на противоположный и с августа 1991 г. происходили знакопеременные флуктуации параметра F . Это свидетельствует о том, что в среднем разломе присутствует полный набор кинематических ситуаций. Есть периоды, когда сдвиговые смещения преобладают над оседаниями, и существуют интервалы времени, когда доминируют локальные изгибы. В среднем за весь период наблюдений локальные изгибы (оседания) превосходят сдвиги примерно в 5 раз, что и отразилось в итоговой, накопленной кривой вертикальных смещений в пределах среднего разлома.

4.2. Определение главных осей сжатия и растяжения по светодальномерным данным методом тензометрического анализа

Основная цель работы заключалась, чтобы методом тензометрического анализа провести селекцию источников деформационного воздействия (зона субдукции и магматизм) по данным измерений вдоль светодальномерных линий на обсерваторию «Мишенная».

Совокупность выбранных линий образует тензометрическую розетку, которая позволяет вычислять инвариантные характеристики деформационного процесса на основе геометрической теории деформаций. Тензометрический анализ результатов наблюдений заключается в определении величин главных деформаций ε_1 и ε_2 , а также в вычислении угла между направлением главных осей – φ_0 .

Расчеты по тензометрическим розеткам основаны на геометрической теории деформации, выведенной из формул Коши [Ляв, 1935; Новожилов, 1958; Филоненко-Бородич, 1959]. Согласно этой теории, если взять какое-либо упругое тело и закрепить его так, чтобы оно не могло перемещаться как недеформированное жесткое целое, то перемещения всякой его точки будут вызываться только деформациями. Тем самым, в точке тела измеряют линейные деформации ε_α , ε_β и ε_γ в трех направлениях x , y , z . При этом ось x совмещают с предполагаемым направлением наибольшей деформации, а углы β и γ между линиями отсчитываются относительно заданной оси x . Линейные деформации вычисляют из системы уравнений [Пригоровский, 1983]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_\alpha &= \varepsilon_x \cos^2 \alpha + \varepsilon_y \sin^2 \alpha + \beta_{xy} \sin \alpha \cos \alpha; \\ \varepsilon_\beta &= \varepsilon_x \cos^2 \beta + \varepsilon_y \sin^2 \beta + \beta_{xy} \sin \beta \cos \beta; \\ \varepsilon_\gamma &= \varepsilon_x \cos^2 \gamma + \varepsilon_y \sin^2 \gamma + \beta_{xy} \sin \gamma \cos \gamma,\end{aligned}\tag{1}$$

где β_{xy} – расчетная деформации сдвига в декартовой системе координат.

При измеренных деформациях в трех направлениях из системы уравнений (1) можно получить угол φ_0 , который равен

$$\varphi_0 = \frac{\arctg\left(\frac{\beta_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y}\right)}{2}. \quad (2)$$

При этом геометрическая теория деформации не требует знаний о реологии среды. Возможность применимости этих формул для неоднородных сред обосновывается в известных монографиях [Костров, 1975; Есиков, 1991].

На Камчатке тензометрические розетки были выбраны на основе предположения, что наибольшее деформационное воздействие на геодинамический полигон оказывают два фактора – субдукция (региональный) и магматизм (локальный), обуславливающий вулканическую активность конкретных вулканов. Линии отбирались схожие по длине и наличию пропусков в рядах, поэтому часть были сразу исключены из расчетов [Фаттахов, 2017].

В результате вычислений получается, что если доминирующим источником в тензометрической розетке выбрать субдукцию, то главная ось сжатия по выбранным розеткам будет направлена на запад. Если же в качестве доминирующего источника выбрать магматизм, то эта ось меняет свое направление на 90° и принимает направление на север (на вулканы). Такое изменение угла может быть обусловлено реальной геометрией расположения потенциальных источников аномальной деформации. На Камчатке светодальномерные линии построены таким образом, что угол между направлениями на вулкан и на зону субдукции составляет примерно 90° .

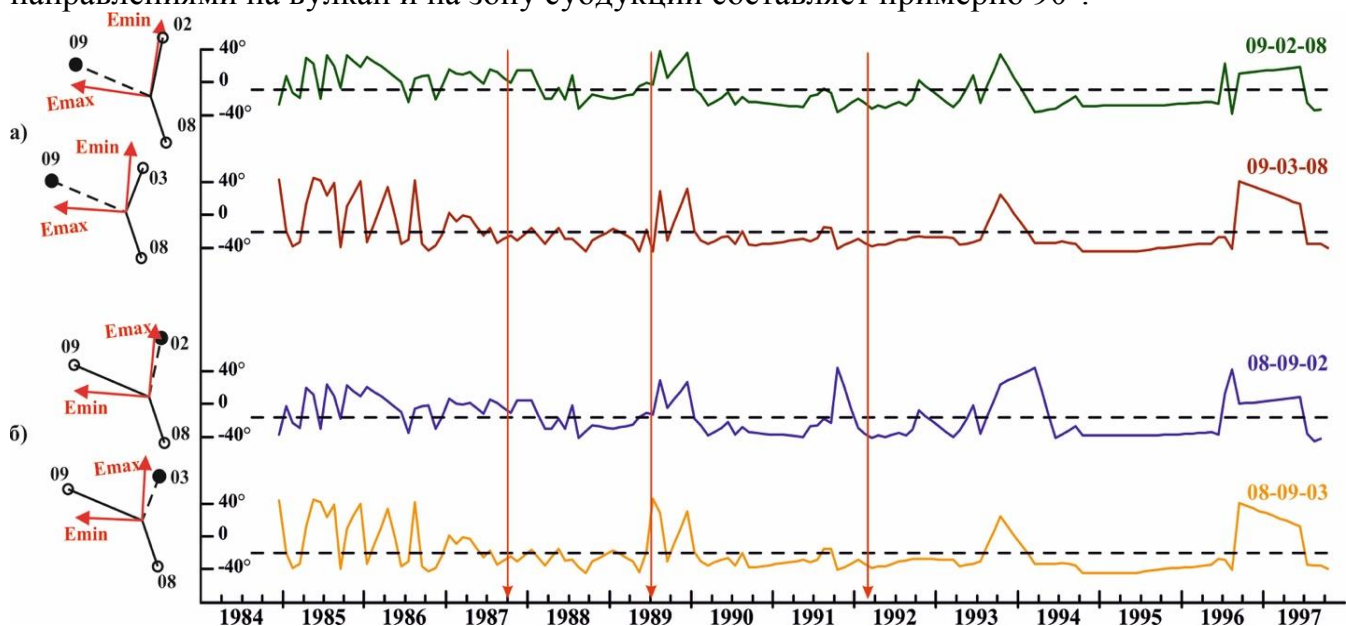


Рисунок 9. Расчетные направления главных осей сжатия и растяжения, а также изменения угла φ_0 во времени: а – доминирующая ось в направлении субдукции; б – доминирующая ось в направлении вулканов. Пунктирные линии – средние углы для тензометрических розеток; вертикальные стрелки – моменты землетрясений

Сравнение главных осей сжатия демонстрирует, что деформации по этим осям подвержены знакопеременным флуктуациям; при этом прослеживается некоторая схожесть в поведении кривых деформаций во времени. Резкие изменения в деформационных сигналах достаточно редки, и далеко не всегда такие изменения по осям коррелируют с изменением угла φ_0 . Например, на всех графиках видно резкое изменение сигнала в июне 1996 года после достаточно продолжительного затишья. В этот же период произошло знакопеременное изменение угла φ_0 . Хорошая корреляция между углом φ_0 и

деформациями прослеживается только в периоды, когда φ_0 почти не изменяется во времени; в эти периоды значимых изменений в деформациях почти не наблюдается. Каких-либо устойчивых связей между деформациями и сильными землетрясениями не обнаружено.

В расчеты погрешности определения главных осей деформации закладываются погрешности измерения базовых линий и вычислений сдвиговой деформации. Расчетная погрешность определения среднего угла главных осей составила 5° , а разница между полученными углами в направлении субдукции и вулканов составила 4° и 2° , что находится в пределах погрешности вычисления.

Выводы главы 4. В результате применения методов геометрической теории деформации для анализа повторных геодеформационных наблюдений были получены следующие выводы:

1. На основе классификации аномальных движений земной коры был предложен новый, улучшенный формализованный подход для селекции типов вертикальных движений земной поверхности в зонах разломов. Показано, что все аномальные изменения сводятся к трем основным типам деформаций: региональный изгиб, локальный изгиб и вертикальный сдвиг. На ряде геодинамических полигонов (сейсмопрогностических и техногенных) показана реализация введенного параметра F , являющегося пространственным фильтром, который выявляет доминирующую роль конкретного типа аномальной активизации разломов. Представлены материалы повторных нивелирных наблюдений вдоль профилей, пересекающих несколько разломных зон. Выявлены периоды смены локального механизма деформационной активности разломов во времени. Разработана методика, которая позволяет проводить скользящее осреднение сдвиговых и изгибовых подвижек вдоль нивелирных линий, пересекающих несколько разломных зон, и установление доминирующего типа аномалий за весь период наблюдений для каждого разлома. Данная методика апробирована в ООО «НПЦ «ПромНедраЭксперт» (г. Москва), от которой получен АКТ о внедрении [Приложение 2].

2. Результаты проведенного анализа данных прецизионных наблюдений напряженно-деформированного состояния земной коры в окрестностях сопки Мишенная (п-ов Камчатка) показывают, что изменения угла φ_0 и деформаций сжатия и растяжения не могут указывать на какой-то единый вектор направления. Изменение во времени напряженно-деформированного состояния земной коры происходит постоянно, особенно в сейсмоактивных регионах; показано, что возможно «включение» различных локальных источников воздействия в различные интервалы времени. Таким образом, это не монотонные движения и оба фактора деформационного воздействия – магматизм и субдукция – могут с одинаковым успехом вносить свой вклад в изменение угла φ_0 .

Таким образом, обосновывается **третье защищаемое положение:**

Доминирующие типы аномалий движений в разломных зонах более достоверно выявляются при использовании теории деформации, которая также позволяет получать адекватную оценку степени влияния различных источников воздействия (вулканы и/или зона субдукции) на деформации земной поверхности в пределах Камчатского геодинамического полигона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексный анализ проведенных исследований позволяет сформулировать вывод, что повторная спутниковая геодезия, проводимая на месторождениях нефти и газа, фиксирует хаотичные смещения земной поверхности, которые трудно интерпретировать. Тем самым, в статье диссертантом вместе с соавторами [Квятковская, Кузьмин, Никитин, Фаттахов, 2017; Квятковская, Фаттахов, 2019] в качестве альтернативы предложено заменить повторные ГНСС наблюдения на построения микротрилатерационных сетей в пределах разломных зон, что в свою очередь уменьшит расходы на проведение работ и повысит точность измерений.

Проведение любых мониторинговых измерений без глубокого статистического анализа исходных рядов приводит к большим погрешностям и неточностям в конечном результате. При этом универсального метода анализа не существует, каждый сигнал (набор сигналов) нужно оценивать индивидуально. Предложенный диссертантом алгоритм удаления различных дефектов на практике показал свою эффективность. На основании него получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022680444 [Приложение 1], а также АКТ о внедрении [Приложение 2].

Проведение статистического анализа на Ашхабадском геодинамическом полигоне по светодальномерным и нивелирным данным позволило уточнить среднегодовые скорости деформаций на Передовом (Ашхабадском) разломе Копетдага. Спектральный анализ продемонстрировал, что временная структура наблюдаемых геодеформационных процессов обусловлена суперпозицией локальных деформационных процессов и не связана напрямую с динамикой регионального взаимодействия Иранской и Туранской микроплит.

Применительно к анализу светодальномерных наблюдений теория деформаций ранее не использовалась. Ее применение позволило рассмотреть светодальномерные линии как тензометрические розетки и предположить 2 источника воздействия при формировании аномальных горизонтальных смещений на Камчатском геодинамическом полигоне. Путем перебора различных сценариев удалось показать, что в различные интервалы времени происходит поочередное «включение» различных источников. Дальнейшее развитие методики анализа данных, а также накопление новых данных на уже созданных полигонных системах наблюдений, позволит находить новые закономерности, оптимизировать алгоритмы обработки и совершенствовать системы мониторинга на геодинамических полигонах.

Разработанный параметр F позволил проводить селекцию типов аномальных вертикальных движений земной поверхности в зонах разломов, а также выявлять доминирующую роль типа активизации разломов во времени. Данная методика успешно внедрена на ряде месторождений для оценки геодинамической обстановки в разломных зонах и может использоваться на других объектах недропользования при анализе результатов геодинамического мониторинга.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических изданиях рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Грунин А.Г., Кузьмин Ю.О., **Фаттахов Е.А.** Проблемные вопросы проектирования геодинамических полигонов на месторождениях УВ // Маркшейдерский вестник. 2014. № 6. С. 24-31. EDN: TFYMNL
2. Кузьмин Ю.О., **Фаттахов Е.А.** Тензометрический метод анализа результатов наблюдений на геодинамических полигонах // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5. С. 22-25. EDN: WZRDDJ
3. Квятковская С.С., Кузьмин Ю.О., Никитин Р.С., **Фаттахов Е.А.** Анализ деформаций земной поверхности на Степновском подземном хранилище газа методами спутниковой и наземной геодезии // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 3. С. 16-32. EDN: WTPCAУ
4. **Фаттахов Е.А.** Спектрально-временной анализ светодальномерных наблюдений на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах // Вестник СГУГиТ. - 2017. - Т. 22, № 4. - С. 5-17. EDN: YTZDSI
5. Кузьмин Ю. О., **Фаттахов Е.А.** Анализ повторных нивелирных наблюдений в зонах разломов методами теории деформаций // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 4. С. 19-36.

Публикации в периодических изданиях рекомендованных ВАК Минобрнауки России, индексируемых в Web of Science и Scopus:

1. Aleshin, I.M., Ivanov, S.D., Koryagin, V.N., Kuz'min, Y.O., Perederin, F.V., Shirokov, I.A., and **Fattakhov, E.A.** Online publication of tiltmeter data based on the SeedLink protocol // Seism. Instrum., 2018, vol. 54, pp. 254-259. DOI: 10.3103/S0747923918030027 EDN: XNDZGH
2. Deshcherevskii, A.V., Sidorin, A.Ya., and **Fattakhov, E.A.** Comprehensive methodology for describing and filtering exogenic effects in monitoring data, taking into account the type of observations and experimental data defects // Seism. Instrum., 2020, vol. 56, pp. 411-433. DOI: 10.3103/S0747923920040027 EDN: IVFBTL
3. Kuzmin, Y.O., Deshcherevskii, A.V., **Fattakhov, E.A.**, Kuzmin, D.K., Kazakov, A.A., and Aman, D.V. Inclimetric observations at the Korchagin Deposit // Izv., Atmos. Ocean. Phys., 2018, vol. 54, pp. 932-940. DOI: 10.1134/S0001433818080066 EDN: BEQODR
4. Kuzmin, Y.O., Deshcherevskii, A.V., **Fattakhov, E.A.**, Kuzmin, D.K., Kazakov, A.A., and Aman, D.V. Analysis of the results of deformation monitoring by the inclinometer system at the Vladimir Filanovsky Field // Izv., Atmos. Ocean. Phys., 2019, vol. 55, pp. 1659-1666. DOI: 10.1134/S0001433819110094 EDN: GZCXEW
5. Kuzmin, Y.O., **Fattakhov, E.A.** & Shirokov, I.A. Analysis of Long-Term Stability of Tilt Registration with Two Instruments of the Same Pedestal. Seism. Instr. 57, 269–275 (2021). <https://doi.org/10.3103/S0747923921030087>
6. **Fattakhov E.A.** Determination of the Major Axes of Compression and Tension from Optical Distance Data by Strain-Gage Analysis (Petropavlovsk Geodynamic Polygon, Kamchatka Peninsula) // Izv., Atmos. Ocean. Phys., 2022, Vol. 58, No. 7, pp. 748–755.
7. Kuzmin, Y.O., **Fattakhov, E.A.** Analysis of the Time Structure of Strain Processes in the Ashgabat Fault Zone (Northern Kopet Dag). Seism. Instr. 58, 148–159 (2022). <https://doi.org/10.3103/S0747923922020062>
8. Gatiyatulin, R.N., Kuzmin, D.K. & **Fattakhov, E.A.** Analysis of the Results of Long-Term Geodetic Observations at the Ultra-Viscous Oil Field, South-East of Tatarstan. Seism. Instr. 58, 270–282 (2022). <https://doi.org/10.3103/S0747923922030057>

Подписано в печать «22» февраля 2024 г.
Формат 64×84/16. Объем 1,5 усл. печ. л.
Тираж 100 шт.

Заказ № _____

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН
123242, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
Тел./факс: (499) 254 90 88