

МАЗУРОВ Борис Тимофеевич

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

25.00.32 – «Геодезия»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Новосибирск - 2007

Работа выполнена в Сибирской Государственной Геодезической Академии.

Научные консультанты – доктор технических наук, профессор
Панкрушин Вениамин Константинович;

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Каленицкий Анатолий Иванович
доктор технических наук, профессор
Колмогоров Вячеслав Георгиевич
доктор технических наук, профессор
Мазурова Елена Михайловна;
доктор физико-математических наук
Тимофеев Владимир Юрьевич.

Ведущая организация – Институт горного дела СО РАН

Защита диссертации состоится « 06 » ноября 2007 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при Сибирской государственной геодезической академии (СГГА) по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, СГГА, ауд.403.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГГА.

Автореферат разослан « » _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Середович В. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Для многих наук о Земле (геологии, геофизики, геодезии, горной механики и других) общепризнанна актуальность проблем «Геодинамика» и «Современные движения земной коры». Важная роль в решении указанных проблем принадлежит геодезии. Методами геодезии и гравиметрии изучаются изменения во времени параметров гравитационного поля и фигуры Земли, ее поверхности, а при изучении глубинных геодинамических процессов большое значение имеет не только геодезическая гравиметрия, но и прикладная, в том числе, разведочная.

Информация о движениях и напряженно-деформированном состоянии (НДС) земной поверхности и земной коры, обусловленных эндогенными и экзогенными факторами, является важнейшей в аспекте прогноза катастрофических геодинамических явлений (землетрясений, извержений вулканов, оползней, сходов ледников, горных ударов и проседания грунтов в области разработки полезных ископаемых и т.п.). Аномальные техногенные геодинамические процессы вызывают горизонтальные сдвиги земной коры, разломообразование, подземные аварии, наводнения; при этом страдают не только промышленные объекты, инженерные конструкции, жилые здания, но и население.

Исследования по изучению геодинамических процессов соответствуют приоритетным направлениям развития науки и техники РФ, в частности, направлению «Экология и рациональное природопользование», имеют научное и практическое значение. Научное значение таких исследований заключается в получении новых знаний о Земле, ее строении, эволюции, разнообразных физических полях (гравитационных, магнитных и др.), пространственно-временной структуре физической поверхности. Важнейшим практическим значением изучения геодинамических процессов является решение задач прогноза, снижения риска и уменьшения последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера, мониторинга окружающей среды. Эти задачи включены в перечень критических технологий РФ.

Степень разработанности проблемы. Геодезия как наука в приложении к геодинамическим исследованиям была востребована всегда, и в настоящее время активно и успешно развивается. Весомый вклад в решение задач изучения геодинамических объектов и процессов по геодезическим и гравиметрическим данным внесли ученые: Бровар В.В., Бузук В.В., Буланже Ю.Д., Васильев Е.А., Вовк И.Г., Герасименко М.Д., Герасимов И.П., Гольдин С.В., Гуляев Ю.П., Еремеев В.Ф., Есиков Н.П., Каленицкий А.И., Канушин В.Ф., Каратаев Г.И., Кафтан В.И., Колмогоров В.Г., Колмогорова П.П., Кузьмин Ю.О., Курленя М.В., Изотов А.А., Леонтьев А.В., Мазурова Е.М., Машимов М.М., Мещеряков Ю.А., Молоденский М.С., Опарин В.Н., Панкрушин В.К., Пеллинен Л.П., Серебрякова Л.И., Сидоров В.А., Страхов В.Н., Татевян С.К., Тимофеев В.Ю., Фотиади Э.Э., Юркина М.И. и др.

Вместе с тем, повышается необходимость совершенствования теоретических положений и методов, методик, алгоритмов и технологий изучения геодинамических процессов на основе моделирования меняющихся во времени геодезических (смещения, закономерности движений, поля деформаций) и гравитационных (аномальные массы, их расположение, закономерности изменения масс) параметров. При этом возникает потребность в строгом подходе к совместной математической обработке разнородных геодезических и геофизических наблюдений на земной поверхности (обратная задача геофизики). Важной является разработка новых технологических решений по информативной и наглядной визуализации результатов математической обработки.

Цель и задачи исследования. Целью работы являлось развитие теории, разработка методики и новых технологических решений математического моделирования меняющихся во времени геодезических и гравитационных параметров (информативных характеристик и признаков), отражающих специфику геодинамических объектов и процессов.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Обоснована теоретически и подтверждена экспериментально необходимость системного подхода к математической обработке результатов геодезических и гравиметрических измерений.

2. Разработана методика настройки дополнительных параметров (коэффициентов моделей) геодинамических процессов и объектов, сил внешних воздействий по критерию оптимальности – минимуму суммы дисперсий оценок величин, определяемых в ходе математической обработки.

3. Выполнена реализация теории и методики в виде алгоритмов и программного обеспечения математической обработки и интерпретации геодезических и гравиметрических данных, визуализации результатов.

Объектом исследований являлись сложные природно-технические системы, процессы их изменений под воздействием природных и техногенных факторов.

Предметом исследований являлись методы моделирования меняющихся во времени геодезических и гравитационных характеристик (признаков) геодинамических процессов.

Методологическая и теоретическая основа исследований базировалась на системно-структурном подходе и системном анализе, математической теории и математических методах изучения динамических систем, теории математической обработки и интерпретации результатов геодезических наблюдений, теории рекуррентной фильтрации, теории упругости, теории фигуры Земли.

Фактический материал и методы исследования. Использовались метод конечных элементов, параметрические и непараметрические методы структурного моделирования, методы статистики и теории погрешностей, метод статистического моделирования на ЭВМ, результаты натурных геодезических измерений.

Для решения поставленных в диссертации задач и проведения вычислительных экспериментов применялись современные вычислительные средства и программное обеспечение. Моделирование геодинимических объектов, пространственно-временных рядов геодезических и гравиметрических наблюдений, их статистический анализ и математическая обработка, наглядное представление результатов вычислительных экспериментов выполнялись по авторским программам в средах программирования Delphi и Matlab, а так же с использованием специализированных пакетов прикладных программ.

Для проверки теоретических положений, алгоритмов, программного обеспечения использовались смоделированные автором данные, а также фактические результаты натуральных геодезических наблюдений на территории Горно-Алтайского геодинимического полигона (до Чуйского землетрясения 2003 года и после - в 2004 году).

При выполнении поискового этапа исследований использовались материалы натуральных геодезических наблюдений, в которых принимал лично участие автор диссертации:

- на геодинимических полигонах (ГДП) по изучению вулканизма и прогнозу землетрясений: Авачинском, Карымском, Петропавловск-Камчатском (п-ов Камчатка, 1990 г);
- на техногенных ГДП: Зейском (Амурская область, 1991 г., район плотины Зейской ГЭС), Губкинском (Ямало-Ненецкая автономная область, 2000 г., район добычи нефти и газа);
- по линии высокоточного нивелирования 1 класса Кызыл-Кош-Агач 1976-1978 годов и 2002-2005 годов (полевые работы Верхне-Енисейского Аэрогеодезического предприятия);
- на промышленных объектах нефтегазового комплекса (диагностика напряженно-деформированного состояния крупногабаритных металлоконструкций геодезическими методами): гг. Пермь, Нижневартовск, Омск, Стрежевой, Ангарск, Анжеро-Судженск, Нижнеудинск, Абакан, Усть-Илимск, Усть-Кут, Хатанга и др.

Информационная база исследования. Используются данные из научных книг, статей, материалов научного конгресса «Гео-Сибирь», научно-технических конференций СГГА, МИИГАиК, Львовского политехнического института, ИГД СО РАН, FIG (Federation Internationale des Geometres), НГУ, межведомственных совещаний по проблемам изучения современных движений земной коры, интернет-источники.

Защищаемые положения.

1. Применение полученных в диссертации уравнений наблюдений, комплексная математическая обработка результатов геодезических и гравиметрических измерений с включением в состав оцениваемого вектора параметров переменных масс геодинимического объекта расширяет возможности поиска решений обратных некорректных задач геофизики.

2. Предлагаемая методика настройки по критерию оптимальности (минимуму обобщенной дисперсии оценок определяемых величин)

позволяет объективно и уверенно определять дополнительные геодезические и гравитационные параметры (коэффициенты) моделей геодинамических процессов.

3. Разработанные новые технологические решения и их программная реализация обеспечивают выполнение оперативной комплексной математической обработки и пространственно-временной интерпретации больших массивов геодезических и гравиметрических наблюдений. При этом достигается более наглядная и информативная, чем раньше, визуализация полей смещений и деформаций по дискретным данным о движениях пунктов, появляются новые возможности для оперативного решения задач прогноза, снижения риска и уменьшения последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера.

Научная новизна исследований.

1. Выведены уравнения наблюдений для обеспечения комплексной математической обработки результатов геодезических и гравиметрических измерений с включением в состав оцениваемого вектора переменных масс геодинамических объектов.

2. Разработана методика настройки дополнительных геодезических и гравитационных параметров (коэффициентов) моделей геодинамических процессов и объектов по критерию оптимальности - минимуму обобщенной дисперсии оценок определяемых величин.

3. Разработаны технологические решения и соответствующие им алгоритмы и программное обеспечение решения по совместной математической обработке и пространственно-временной интерпретации больших массивов геодезических и гравиметрических наблюдений, наглядной визуализации результатов.

Теоретическая значимость работы

Расширена тематика и область применения геодезии и гравиметрии в геодинамических исследованиях при решении обратных задач геофизики. Усовершенствованы методы математического моделирования геодинамических объектов и процессов по результатам геодезических и гравиметрических наблюдений.

Исследования проведены в соответствии с планом госбюджетных фундаментальных научно-исследовательских работ, выполняемых по заданию Министрства образования и науки РФ. Темы НИР:

- «Теория и методы математического моделирования напряженно-деформированного состояния земной коры по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям в аспекте снижения риска геодинамических катастроф» (с 1.01.2004 по 31.12.2006);
- «Исследование сложных самоорганизующихся объектов и информационных систем геодезии» (с 1.01.2001 по 31.12.2005);
- «Исследование и разработка теории и методов идентификации движений и напряженно-деформированного состояния

геодинамических систем по разнородным геодезическим и геофизическим наблюдениям» (с 1.01.2007).

При проведении исследований осуществлялось активное сотрудничество с академическими научными институтами СО РАН (Институт горного дела, Институт нефтегазовой геологии и геофизики, Институт вычислительной математики и математической геофизики и др.) в рамках выполнения совместных проектов:

- междисциплинарный интеграционный проект фундаментальных исследований № 93 «Разработка методов и создание систем сейсмодиформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов»;
- комплексный интеграционный проект № 6 - 18 «Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия».

Практическая значимость исследования

Разработанные методика и технологические решения по изучению геодинамических объектов и процессов на основе оценки геодезических и гравитационных параметров моделей открывают новые возможности для решения задач прогноза, снижения риска и уменьшения последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера.

Практическое применение результатов исследований выполнено в рамках хоздоговорных НИР с Верхнеенейским АГП по обработке и анализу результатов повторного нивелирования в Горном Алтае и с Сибирским центром технической диагностики и экспертизы ДИАСИБ, осуществляющем экспертизу промышленной безопасности потенциально опасных производств и объектов, что подтверждено актами о внедрении. Результаты исследований включены в учебную программу студентов СГГА, обучающихся по специальности «Астрономо-геодезия» и используются при выполнении дипломных работ.

Апробация результатов исследования.

Результаты исследований, полученные в диссертации, неоднократно докладывались автором на российских и зарубежных конгрессах, конференциях и совещаниях, в том числе: IX-й съезд ВАГО, (Новосибирск, 1990), XIII Межведомственное совещание по изучению современных движений земной коры на геодинамических полигонах, (Ташкент, 1991), международная конференция Интеркарто 3 «ГИС для устойчивого развития окружающей среды», (Новосибирск, 1997), Третий Сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ-98), (Новосибирск, 1998), научно-технические конференции преподавателей СГГА «Современные проблемы геодезии и оптики», (Новосибирск, (1995 – 2004), «Фотограмметрические технологии в XXI веке», (Новосибирск, 2003), «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли», (Новосибирск, 2003, 2005), «Проблемы и перспективы развития горных наук», (Новосибирск, 2004), международная науч.-тех. конф, посвященная 225-летию МИИГАиК, (Москва, 2004), Международный научный конгресс «ГЕО-СИБИРЬ»,

(Новосибирск, 2005, 2006, 2007), международная конференция СУЧАСНІ ДОСЯГНЕННЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ НАУКИ ТА ВИРОБНИЦТВА, (Львів, 2004), VIII международная науч.-практ. конференция Geoinfocad, (Франция, Ницца, 2004), FIG Working Week 2004, (Athens, Greece, 2004), Fifth International Symposium "Turkish-German Joint Geodetic Days" (Berlin, Germany, 2006).

По теме диссертации опубликовано 46 статей (в том числе, 9 статей в реферируемых изданиях, утвержденных ВАК для защиты докторских диссертаций, 2 статьи под эгидой международного союза геодезистов (FIG) (на английском языке), одна монография (с соавторами)).

Структура диссертации. Работа состоит из введения, пяти разделов и списка литературы из 244 наименований. Полный объем диссертации 244 страницы, включая 75 рисунков, 44 таблицы, 5 приложений.

Основное содержание работы

Краткое описание содержания диссертации

Во введении отражена актуальность темы исследований, показана степень разработанности проблемы, обоснованы цель и задачи, объект и предмет исследований, научная и практическая значимость, приведены основные результаты реализации поставленных в диссертационной работе задач, а также научные положения, выносимые на защиту.

Первый раздел «Состояние изучения геодинамических объектов и процессов (состояние вопросов)» посвящен обзору публикаций на тему изучения геодинамических процессов и объектов по геодезическим и геофизическим данным.

Во втором разделе «Изучение напряженно-деформированного состояния сложных инженерных сооружений» дана теория метода математического моделирования движений и напряженно-деформированного состояния (НДС) сооружений и объектов инженерной геодинамики по геодезическим наблюдениям. Описываются методика и вычислительный эксперимент обработки трех циклов (эпох) пространственно-временных рядов геодезических наблюдений параметров движений и напряженно-деформированного состояния локального геодинамического объекта (ГО) с оценкой точности их определения. В качестве локального ГО выбрана модель плотины, работающая в условиях плоской деформации. Выполненный сравнительный анализ методов определения НДС по действующим силам (аналитические, проектные расчеты НДС) и геодезическим наблюдениям в пространстве и времени приводит к выводу о необходимости совместного использования этих методов. При этом аналитические (проектные) расчеты НДС, выполненные по информации о возмущающих силах и априорных физических свойствах объекта, контролируются и настраиваются (корректируются) в процессе строительства и эксплуатации инженерных сооружений по натурным геодезическим наблюдениям в пространстве и времени.

В третьем разделе «Методика изучения геодинамических процессов на основе моделирования вертикальных движений и вариаций силы тяжести»

приведены примеры совместной математической обработки и интерпретации пространственно-временных рядов комплексных геодезических и гравиметрических наблюдений в районе действующего вулкана и в условиях перемещения больших объемов руды и пород. Эти примеры соответствуют задаче разделения собственно движений физической поверхности и вариаций во времени внешнего гравитационного поля Земли (смещений уровенных поверхностей потенциала силы тяжести и изменений положений отвесных линий во времени).

Предлагается способ настройки (адаптации) дополнительных геодезических и гравитационных параметров (коэффициентов) геодинамического процесса по критерию оптимальности рекуррентного фильтра Калмана-Бьюси – минимуму обобщенной дисперсии (суммы дисперсий) оцениваемых величин.

В четвертом разделе «Изучение движений и напряженно-деформированного состояния района готовящегося вулканического извержения по результатам геодезических и гравиметрических наблюдений» представлено развитие теории и методов изучения объектов геодинамики по комплексным геодезическим и гравиметрическим наблюдениям, дающие возможность получать характеристики как вертикальных, так и горизонтальных движений земной поверхности и изменений аномальных масс. Значительно расширен состав ряда разнородных наблюдений, включающий гравиметрические, угловые, линейные измерения, нивелирование и GPS-наблюдения.

В пятом разделе «Технологические решения для моделирования геодинамических объектов по натурным данным» приведены разработанные автором программы в различных средах программирования, реализующие алгоритмы изучения геодинамических объектов и процессов по геодезическим и гравиметрическим данным. На примере обработки натурных данных Алтайской GPS-сети 2001 – 2004 годов продемонстрированы возможности технологии компьютерной визуализации полей смещений и деформаций.

В заключении подведены основные итоги диссертационных исследований и намечены перспективы их дальнейшего развития.

Защищаемые положения

1. Применение полученных в диссертации уравнений наблюдений, комплексная математическая обработка результатов геодезических и гравиметрических измерений с включением в состав оцениваемого вектора параметров переменных масс геодинамического объекта расширяет возможности поиска решений обратных некорректных задач геофизики.

Эксперимент 1. Значимые вертикальные смещения точек земной поверхности и смещения уровенных поверхностей во времени могут возникать, в частности, при разработке крупных месторождений полезных ископаемых. В России имеется ряд месторождений, для которых характерно перемещение больших масс руд и пород. Для мониторинга деформационных

процессов применяют высокоточные геодезические наблюдения. Для определения вертикальных движений земной поверхности в районах добычи полезных ископаемых используется геометрическое нивелирование. Поле силы тяжести в конкретном районе зависит от распределения масс внутри Земли. Перераспределение больших объемов пород и руды вызовет соответственно значительное изменение поля силы тяжести, а недоучет влияния перемещенных масс на результаты нивелирования может быть причиной неверного представления о картине вертикальных движений.

Для того, чтобы оценить степень влияния перемещенных масс на результаты нивелирования была смоделирована ситуация, соответствующая добыче и перемещению руды с наличием одновременно вертикальных движений в районе месторождения (Рисунок 1). Возникающее при перемещении руды аномальное гравитационное поле было аппроксимировано как система двух масконов ((mass concentration).

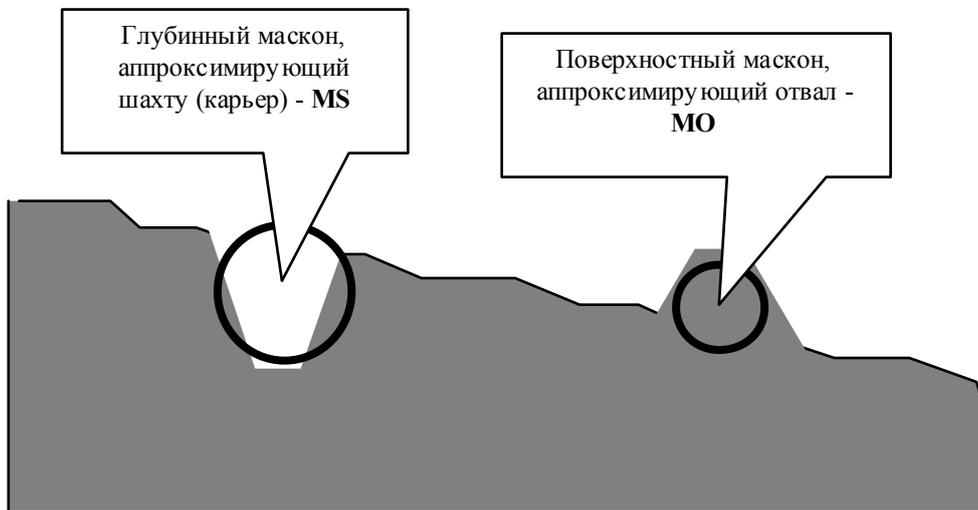


Рисунок 1 - Аппроксимация масконами шахты (карьера) и отвала пород

Модельная система наблюдений за вертикальными движениями и вариациями силы тяжести включает нивелирные наблюдения (рисунок 2) и гравиметрические наблюдения (определение абсолютных значений силы тяжести на пяти пунктах этой сети).

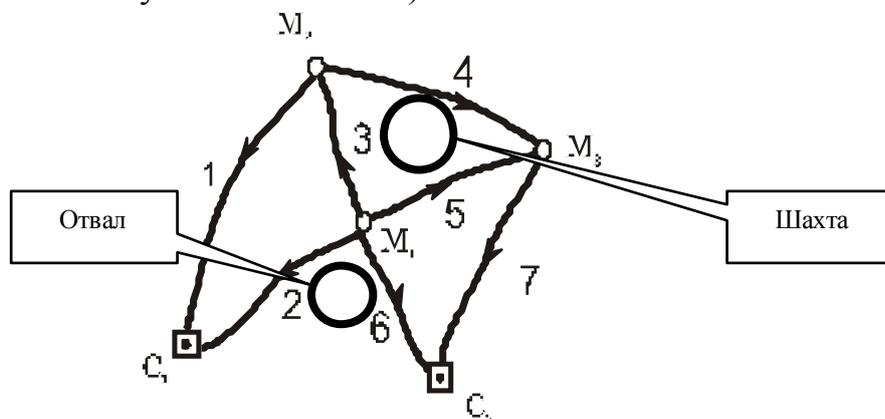


Рисунок 2 - Сеть нивелирования

Вычислительный эксперимент по комплексной математической обработке нивелирных и гравиметрических наблюдений показал, что за 3 года влияние перемещения масс $M_S = \frac{4}{3} \pi R S^3 \delta = 2.97 * 10^8$ тонн и $M_O = \frac{4}{3} \pi R O^3 \delta = 1.94 * 10^8$ тонн на результаты наблюдений нивелирных превышений достигло 4 мм – величин, сопоставимых с величинами естественных вертикальных смещений реперов. Изменение силы тяжести составило 2 мгал, что существенно превышает разрешительные возможности метода и обеспечивает уверенную оценку аномальных явлений.

Эксперимент 2. Значительные перемещения масс с одновременно происходящими вертикальными движениями земной поверхности происходят во время крупных вулканических извержений. В качестве физической модели геодинамического объекта был выбран локальный участок на земной поверхности, расположенный в области действующего вулкана (рисунок 3). Изменение гравитационного поля на данном локальном участке местности обусловлено перемещением аномальных масс вдоль подводящего канала вулкана от зоны образования магмы до магматической камеры, заполнением камеры и выходом магмы на поверхность при извержении вулкана (формирование его конуса). Одновременно происходят вертикальные движения физической поверхности вблизи вулкана.

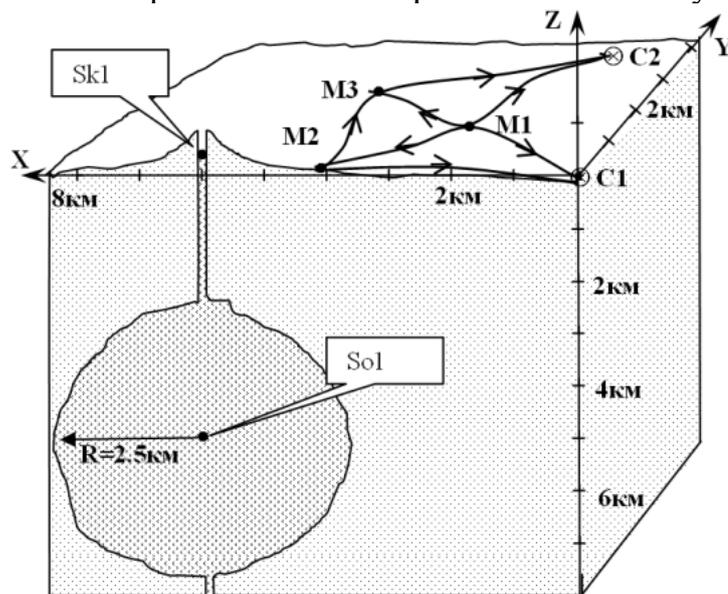


Рисунок 3 - Физическая модель геодинамического объекта и системы наблюдений

Модельная система наблюдений за геодинамическим объектом включает нивелирные и гравиметрические наблюдения в пространстве и времени – и повторяет по конфигурации систему наблюдений в 1-м эксперименте (рисунок 2).

Для составления общей системы уравнений геодезических и гравиметрических наблюдений, которые были бы связаны общими параметрами, принят тот же подход, что и в 1-м эксперименте - аппроксимация аномального гравитационного поля масконами. Поэтому в

вектор параметров $X_R(t)$ геодинимического объекта (рисунок 3) входят: геодезические отметки мобильных пунктов H_{M1}, H_{M2}, H_{M3} , параметры вертикальных смещений мобильных пунктов u_{M1}, u_{M2}, u_{M3} , масса MK маскона, аппроксимирующего аномальное гравитационное поле, и масса δMK , аппроксимирующая изменение (вариацию) аномального гравитационного поля. Масса маскона MK аппроксимирует влияние конуса вулкана, а через массу δMK может быть определена масса маскона MO , аппроксимирующего влияние пустого шарового маскона в верхней части магматической камеры.

Введение в вектор параметров аномальных масс позволяет компактно описывать локальное гравитационное поле. По значениям и координатам этих масс могут быть вычислены компоненты уклонений отвесной линии ξ, η и аномалия силы тяжести Δg для любой точки геодинимической системы.

С учетом этого подхода система наблюдений моделируется линейным уравнением

$$Y(t) = A(t) X_R(t) + \delta(t), \quad (1)$$

где $A(t)$ – матрица коэффициентов уравнений наблюдений; $Y(t)$ – вектор измеренных величин; $X_R(t)$ – вектор определяемых параметров состояния геодинимической системы, в который входят: отметки H_i пунктов сети наблюдений, аномальные массы, параметры движений пунктов сети наблюдений; $\delta(t)$ – вектор ошибок наблюдений.

Для первой эпохи (до извержения) вектор параметров будет состоять только из отметок мобильных пунктов H_{M1}, H_{M2}, H_{M3} и массы конуса вулкана MK :

$$X_R(t=1) = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, MK)^T. \quad (2)$$

Для эпох 2, 3 и 4 вектор параметров будет состоять из отметок мобильных пунктов H_{M1}, H_{M2}, H_{M3} , характеристик вертикальных движений этих пунктов, массы конуса вулкана MK и массы δMK , аппроксимирующей изменение (вариацию) аномального гравитационного поля. Например, если принимается гипотеза равномерного произвольного вертикального движения каждого мобильного пункта, то вектор параметров для эпохи 2, 3 и 4 будет:

$$X_R = (H_{M1}, H_{M2}, H_{M3}, u_{M1}, u_{M2}, u_{M3}, MK, \delta MK)^T, \quad (3)$$

где u_{M1}, u_{M2}, u_{M3} – вертикальные смещения мобильных пунктов между соседними эпохами.

Пример уравнения наблюдений абсолютного значения силы тяжести g – уравнение наблюдений g на пункте C_1 в эпоху $t=l$:

$$g_{C1}(t=1) = g_{C1}^F + k_{g_{C1}}^{MK}(t=1)MK(t=1) + \delta_{g_{C1}}(t=1). \quad (4)$$

В этом уравнении $g_{C_1}^F$ - фоновая (без влияния конуса) составляющая поля силы тяжести в данном пункте, $\delta_{g_{C_1}}(t=1)$ – ошибка измерения силы тяжести в эпоху 1 на пункте C_1 . Коэффициент $k_{g_{C_1}}^{MK}(t=1)$ при $MK(t=1)$ вычисляем по известным координатам пункта C_1 линии нивелирования и координатам центра шарового маскона $Sk1$:

$$k_{g_{C_1}}^{MK}(t=1) = \frac{G \cdot \Delta Z_{C_1, Sk1}(t=1)}{r_{C_1, Sk1}^3(t=1)}, \quad (5)$$

где

$$r_{C_1, Sk1}(t=1) = \sqrt{\Delta X_{C_1, Sk1}^2(t=1) + \Delta Y_{C_1, Sk1}^2(t=1) + \Delta Z_{C_1, Sk1}^2(t=1)}, \quad (6)$$

G – гравитационная постоянная

В формулах (5) и (6) учтено возможное изменение от эпохи к эпохе как координат пункта, так и координат центра шарового маскона:

$$\Delta X_{C_1, Sk1}(t=1) = X_{C_1}(t=1) - X_{Sk1}(t=1),$$

$$\Delta Y_{C_1, Sk1}(t=1) = Y_{C_1}(t=1) - Y_{Sk1}(t=1),$$

$$\Delta Z_{C_1, Sk1}(t=1) = Z_{C_1}(t=1) - Z_{Sk1}(t=1).$$

Приведем пример уравнения наблюдения нивелирного превышения $h_1(t=1)$. С учетом схемы сети (рисунок 3) это превышение выражаем как функцию от вектора параметров:

$$h_1(t=1) = H_{M_2}(t=1) - H_{C_1} + k_{h_1}^{MK}(t=1)MK(t=1) + \delta_{h_1}(t=1), \quad (7)$$

где $H_{M_2}(t=1)$ - отметка пункта M_2 в эпоху 1; H_{C_1} - отметка исходного (стабильного) пункта C_1 ; $\delta_{h_1}(t=1)$ – ошибка измерения превышения между пунктами C_1 и M_2 ; $MK(t=1)$ - масса маскона, моделирующего конус вулкана в эпоху 1; $k_{h_1}^{MK}(t=1)$ - коэффициент, учитывающий влияние этого маскона на превышение $h_1(t=1)$. Величина $k_{h_1}^{MK}(t=1)$ вычисляется по известным координатам начального пункта линии нивелирования M_2 , конечного пункта линии нивелирования C_1 и координатам центра шарового маскона $Sk1$:

$$k_{h_1}^{MK}(t=1) = -\frac{G}{2\gamma} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{\Delta X_{C_1, Sk1}(t=1)}{r_{C_1, Sk1}^3(t=1)} + \frac{\Delta X_{M_2, Sk1}(t=1)}{r_{M_2, Sk1}^3(t=1)} \right) \Delta X_{C_1, M_2}(t=1) + \\ & \left(\frac{\Delta Y_{C_1, Sk1}(t=1)}{r_{C_1, Sk1}^3(t=1)} + \frac{\Delta Y_{M_2, Sk1}(t=1)}{r_{M_2, Sk1}^3(t=1)} \right) \Delta Y_{C_1, M_2}(t=1) \end{aligned} \right]. \quad (8)$$

В эпохи 2, 3 и 4 в уравнениях наблюдений присутствуют слагаемые, учитывающие влияние не только увеличивающейся массы конуса вулкана (маскон MK) но и уменьшение массы в магматическом очаге (маскон MO), а также изменение высоты мобильных пунктов (через вертикальный градиент силы тяжести $\frac{\partial \gamma}{\partial H} = -0.3086 \frac{мкГал}{мм}$).

Результатом последующей комплексной математической обработки и интерпретации смоделированных пространственно-временных рядов геодезических и гравиметрических наблюдений явились оценки отметок мобильных пунктов, оценки вертикальных смещений этих пунктов, оценки аномалий силы тяжести, компонент уклонений отвесной линии и аномалия высоты на пунктах геодезической сети с оценкой их точности в 4-х эпохах. Обработка наблюдений выполнялась для четырех конкурирующих моделей. Используя F-критерий, была выбрана адекватной модель, описывающая динамику земной поверхности равномерным вращением блока с мобильными пунктами. Динамика гравитационного поля при этом описывалась изменениями масс поверхностного и глубинного масконов в соответствии с экспоненциальным законом излияния магмы и значениями доли остающегося на поверхности конуса излившегося вещества в эпохи 2 и 3 – 70%, в эпоху 4 – 90%.

Влияние излившейся магмы, имеющей массу $M_{\text{изл}}(t=4) = 8.61 \cdot 10^9$ тонн, вызывает изменение значений силы тяжести в пунктах сети до 7.8 мгал, а в нивелировании превышений - 25 мм. Это указывает на возможность уверенного комплексного выявления аномальных геодезических и гравитационных параметров геодинамических процессов.

Необходимым элементом комплексного изучения глубинных геодинамических процессов должна быть интерпретация результатов измеряемого поля силы тяжести и его аномальных характеристик. Сглаживание поля силы тяжести через вычисление потенциала снижает разрешающую способность гравиметрического метода улавливать глубинные сейсмо-тектонические проявления, следствия которых на поверхности могут запаздывать на 2-7 лет. Поэтому одним из результатов эксперимента 2 являлась визуализация вариаций силы тяжести по методу крайгинга с целью их возможного экспертного изучения.

Эксперимент 3. Одновременно с вертикальными движениями земной поверхности могут происходить горизонтальные движения. Для их изучения состав системы разнородных наблюдений должен быть расширен. Поэтому в третьем эксперименте были смоделированы гравиметрические, угловые, линейные измерения, нивелирование и GPS-наблюдения.

В качестве геодинамического объекта была выбрана вулканическая область, испытывающая напряженно-деформированное состояние. Одной из важных проблем в вулканологии и геодинамике является исследование накопления магмы в магматических очагах и ее подъем к поверхности. В механическом аспекте эта проблема может решаться с привлечением методов геодезии и геофизики. Геодезические методы (нивелирование, угловые, линейные измерения, GPS-наблюдения) позволяют определить перемещения земной поверхности, которые являются следствием меняющегося напряженно-деформированного состояния в окрестности вулканического очага. Но это изменение НДС является в свою очередь следствием увеличения внутриочагового давления при накапливании магмы в верхнем

магматическом очаге вулкана. Таким образом, мы имеем дело с перемещением масс (наполнение верхнего магматического очага). Следовательно, наблюдения геодезическими приборами, которые устанавливаются в рабочее положение с помощью уровня, должны обрабатываться совместно с гравиметрическими наблюдениями.

Глубина центра верхнего шарообразного магматического очага была принята равной 5000 м, величина радиуса очага - 2500 м – как в эксперименте 2 (рисунок 3).

Литосфера принимается вязкоупругой с коэффициентом вязкости $\eta_{лит.} = 10^{17} Па \cdot с$ и модулем упругости $E = 10^{10} Па$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, магматический очаг сферическим. Также как и в эксперименте 2 имеем два маскона - глубинный (магматический очаг) и поверхностный (конус вулкана).

Масса поверхностного маскона - конуса принята в нашей модели равной

$$M_k = 1.55 \cdot 10^8 \text{ тонн.} \quad (9)$$

Масса глубинного маскона меняется со временем – увеличивается по мере поступления магмы в очаг. Аномальная масса глубинного маскона при скорости увеличения объема в очаге $v_V = 5 \cdot 10^7 \frac{м^3}{год}$ и плотности пород (пироксенит, перидотит, дунит) $\delta = 3.25 \frac{г}{см^3}$ для эпохи $t=2$ составит

$$M_o(t=2) = 3.25 \cdot 10^8 \text{ тонн} \quad (10)$$

и для эпохи $t=3$

$$M_o(t=3) = 6.50 \cdot 10^8 \text{ тонн.} \quad (11)$$

Опорной основой системы наблюдений являются заложенные в окрестности вулкана 10 геодезических пунктов. Из этих 10-ти пунктов два (С1 и С2), как наиболее удаленные от конуса вулкана приняты условностабильными, но их пространственное положение должно определяться методами GPS/ГЛОНАСС наблюдений с привязкой к постоянно действующим пунктам международной GPS-службы (IGS). Для определения координат мобильных пунктов с номерами 1, 2, ..., 8 с привязкой к пунктам С1 и С2 были организованы высокоточные геодезические наблюдения: GPS-сеть (рисунок 4), нивелирная сеть (рисунок 5) и линейно-угловая сеть (рисунок 6).

Для первой эпохи вектор параметров будет состоять только из координат 8-ми мобильных пунктов и массы конуса вулкана MK :

$$X_R(t=1) = (X_1, Y_1, H_1, \dots, X_8, Y_8, H_8, MK)^T. \quad (12)$$

Для эпох 2, 3 вектор параметров будет состоять из координат и характеристик горизонтальных и вертикальных движений этих пунктов, массы конуса вулкана MK и прироста массы вулканического очага δMO , аппроксимирующего изменение (вариацию) аномального гравитационного поля. Например, если принимается гипотеза равномерного произвольного

движения каждого мобильного пункта, то вектор параметров для эпохи 2 и 3 будет:

$$X_R(t=2) = X_R(t=3) = (X_1, Y_1, H_1, \dots, X_8, Y_8, H_8, MK, u_{X_1}, u_{Y_1}, u_{H_1}, \dots, u_{X_8}, u_{Y_8}, u_{H_8}, \delta MO)^T, \quad (13)$$

где $u_{X_1}, u_{Y_1}, u_{H_1}, \dots, u_{X_8}, u_{Y_8}, u_{H_8}$ - горизонтальные и вертикальные смещения мобильных пунктов с номерами 1, 2, ..., 8 между соседними эпохами.

Уравнения наблюдений составлялись с учетом входящих в векторы параметров (12) и (13) аномальных масс MK и δMO . В уравнениях для нивелирных превышений h , горизонтальных углов β и измерений силы тяжести g коэффициенты k_h^{MK} , k_β^{MK} , k_g^{MK} перед параметром MK и $k_h^{\delta MO}$, $k_\beta^{\delta MO}$, $k_g^{\delta MO}$ перед параметром δMO необходимы для учета влияния на наблюдения аномальных масс - поверхностного маскона MK , аппроксимирующего конус вулкана и прироста массы шарового глубинного маскона δMO , аппроксимирующего вулканический очаг (рисунок 24). Примеры формул вычисления коэффициентов для уравнений наблюдений силы тяжести и нивелирных превышений даны выше - формулы (4), (5) и (7), (8).

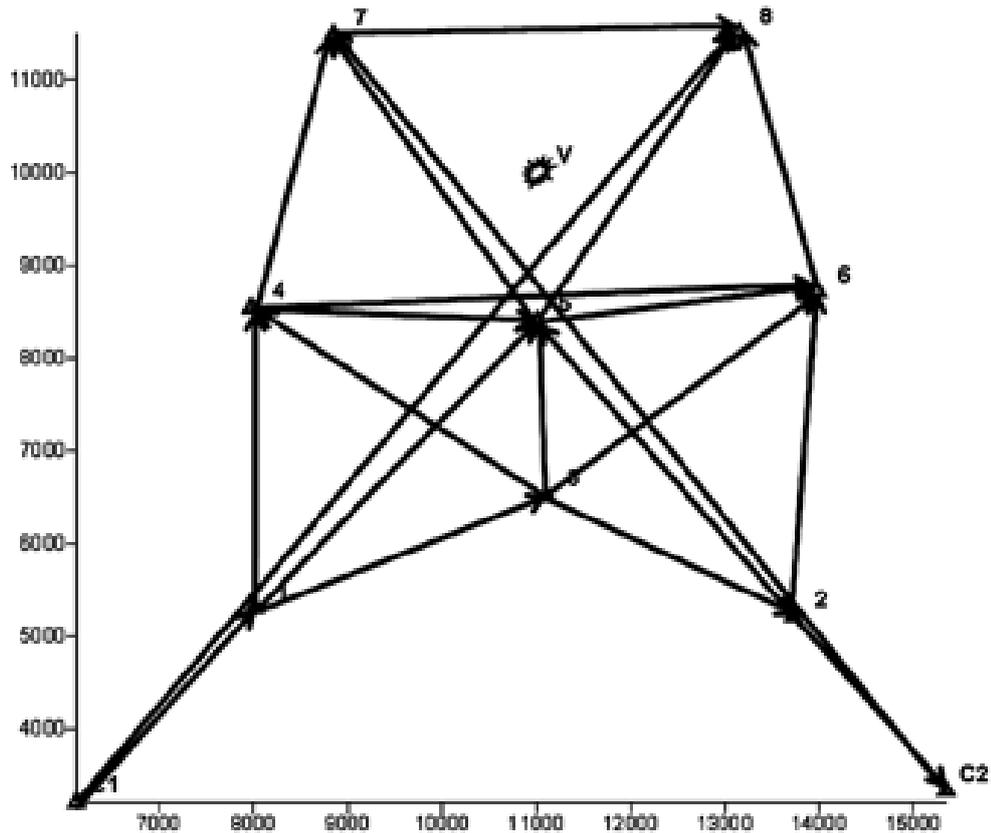


Рисунок 4 - Схема GPS-сети в вулканической области

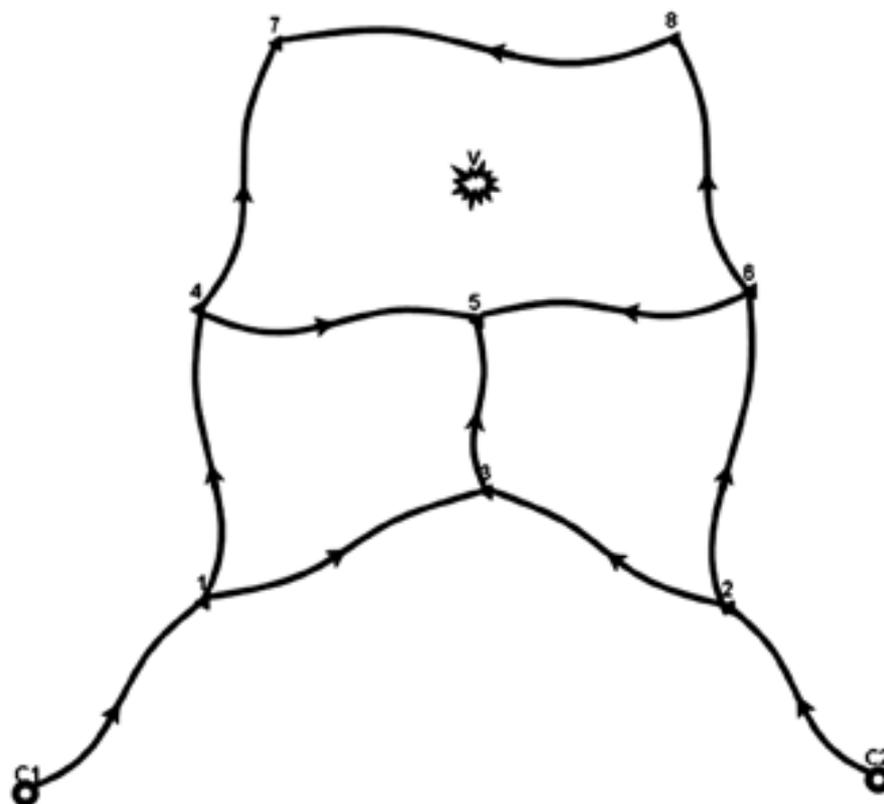


Рисунок 5 - Схема сети нивелирования в вулканической области

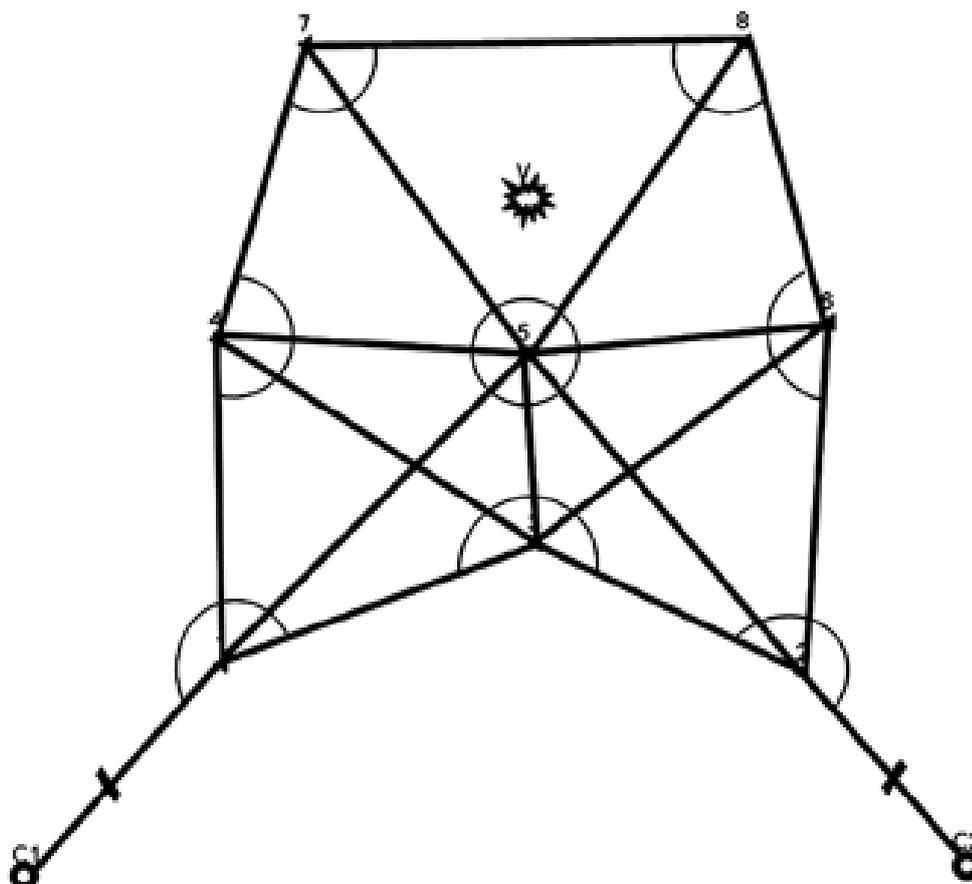


Рисунок 6 - Схема линейно-угловой сети в вулканической области

Уравнение наблюдений измеренного угла было выведено с учетом формулы поправки в направлении за уклонение отвесной линии для небольших расстояний между пунктами:

$$\delta A_{12} = (\eta_1 \cos A_{12} - \xi_1 \sin A_{12}) \operatorname{ctg} z_{12} - \eta_1 \operatorname{tg} B_1. \quad (14)$$

В формуле (14) η_1 , ξ_1 - составляющие уклонения отвесной линии в плоскости меридиана и первого вертикала, A_{12} , z_{12} азимут и зенитное расстояние направления 12, B_1 - геодезическая широта пункта 1.

Для угла β , образованного двумя направлениями 12 (правое) и 13 (левое) может быть найдена поправка за уклонение отвесной линии в угол β :

$$v_\beta = \delta A_{12} - \delta A_{13} = (\eta_1 \cos A_{12} - \xi_1 \sin A_{12}) \operatorname{ctg} z_{12} - (\eta_1 \cos A_{13} - \xi_1 \sin A_{13}) \operatorname{ctg} z_{13}. \quad (15)$$

Уклонения отвесной линии для нашего объекта возникают в результате влияния массы конуса вулкана MK и прироста массы магматической камеры: δMO , например, для пункта 1

$$\xi_1 = -\frac{\Delta g_{1x}}{g_1} = -G \frac{\Delta X_{1S\text{конуса}}}{g_1 r_{1S\text{конуса}}^3} MK - G \frac{\Delta X_{1S\text{камеры}}}{g_1 r_{1S\text{камеры}}^3} \delta MO, \quad (16)$$

$$\eta_1 = -\frac{\Delta g_{1y}}{g_1} = -G \frac{\Delta Y_{1S\text{конуса}}}{g_1 r_{1S\text{конуса}}^3} MK - G \frac{\Delta Y_{1S\text{камеры}}}{g_1 r_{1S\text{камеры}}^3} \delta MO. \quad (17)$$

В формулах (16) и (17) G - гравитационная постоянная, Δg_{1x} , Δg_{1y} - составляющие вектора силы тяжести g_1 в пункте 1 по оси X и Y соответственно в прямоугольной пространственной топоцентрической горизонтной системе координат. Ось X лежит в плоскости меридиана, ось Y - в плоскости первого вертикала. $\Delta X_{1S\text{конуса}}$, $\Delta Y_{1S\text{конуса}}$ - разность координат X и Y пункта 1 и центра маскона, аппроксимирующего конус вулкана, $\Delta X_{1S\text{камеры}}$, $\Delta Y_{1S\text{камеры}}$ - разность координат X и Y пункта 1 и центра маскона, аппроксимирующего магматический очаг вулкана, $r_{1S\text{конуса}}$, $r_{1S\text{камеры}}$ - расстояния от пункта 1 до центра маскона, аппроксимирующего конус вулкана и центра маскона, аппроксимирующего магматический очаг вулкана.

С учетом этого, например, уравнение наблюдений горизонтального угла, образованного направлениями 13 и 12 будет

$$\beta(t=2) = \operatorname{arctg} \frac{Y_3(t=2) - Y_1(t=2)}{X_3(t=2) - X_1(t=2)} - \operatorname{arctg} \frac{Y_2(t=2) - Y_1(t=2)}{X_2(t=2) - X_1(t=2)} + k_\beta^{MK}(t=2)MK(t=2) + k_\beta^{\delta MO}(t=2)\delta MO(t=2) + \delta_\beta \quad (18)$$

Коэффициенты при аномальных массах представлены формулами:

$$k_{\beta}^{MK}(t=2) = -\frac{G}{g_1^3 r_{1Skонуса}} [(\sin A_{12} \operatorname{ctg} z_{12} - \sin A_{13} \operatorname{ctg} z_{13}) \Delta X_{1Skонуса} - (\cos A_{12} \operatorname{ctg} z_{12} - \cos A_{13} \operatorname{ctg} z_{13}) \Delta Y_{1Skонуса}] MK \quad (19)$$

и

$$k_{\beta}^{\delta MO}(t=2) = -\frac{G}{g_1^3 r_{1Скамеры}} [(\sin A_{12} \operatorname{ctg} z_{12} - \sin A_{13} \operatorname{ctg} z_{13}) \Delta X_{1Скамеры} - (\cos A_{12} \operatorname{ctg} z_{12} - \cos A_{13} \operatorname{ctg} z_{13}) \Delta Y_{1Скамеры}] \delta MO \quad (20)$$

Если бы в состав наблюдений входили зенитные расстояния, то в уравнениях наблюдений тоже бы присутствовали слагаемые, учитывающие переменные аномальные массы.

Например, для зенитного расстояния 12 уравнение наблюдений будет:

$$z(t=2) = \operatorname{arccctg} \frac{Z_2(t=2) - Z_1(t=2)}{\sqrt{(X_2(t=2) - X_1(t=2))^2 + (Y_2(t=2) - Y_1(t=2))^2}} + k_z^{MK} MK(t=2) + k_z^{\delta MO} \delta MO(t=2) + \delta_z \quad (21)$$

$$\text{где } k_z^{MK} = -\frac{G}{g_1^3 r_{1Skонуса}} (\Delta X_{1Skонуса} \cos A_{12} + \Delta Y_{1Skонуса} \sin A_{12}) \quad (22)$$

$$\text{и } k_z^{\delta MO} = -\frac{G}{g_1^3 r_{1Скамеры}} (\Delta X_{1Скамеры} \cos A_{12} + \Delta Y_{1Скамеры} \sin A_{12}). \quad (23)$$

В уравнениях наблюдений светодальномерных дальностей и GPS-наблюдений влияние аномальных масс не учитывалось.

Учет влияния притока магмы, имеющей массу $M_0(t=3) = 6.50 \cdot 10^8$ тонн, показывает на изменение значений силы тяжести в пунктах сети до 0.2 мгал, на нивелирные превышения до 0.5 мм, на горизонтальные углы менее 0.1". Эти величины малы, но сопоставимы с точностью измерений, а, следовательно, должны быть учтены при интерпретации результатов наблюдений.

Результатом последующей совместной математической обработки и интерпретации смоделированных пространственно-временных рядов геодезических и гравиметрических наблюдений явились оценки пространственных координат мобильных пунктов, оценки горизонтальных и вертикальных смещений этих пунктов, оценки аномальных масс – поверхностного маскона, аппроксимирующего конус вулкана и глубинного маскона, аппроксимирующего накопление избыточной массы в магматическом очаге (таблица 1).

Были определены основные характеристики НДС вулканической области (в соответствии с моделью шара в упругом полупространстве) и глубина вулканического очага с последующей компьютерной визуализацией результатов.

Таблица 1- Оценки параметров и их СКП для эпохи 3

№ пункта	Параметр (размерность)	Оценка параметра	СКП
1	2	3	4
	МК (тонн)	14.996	$0.096 \cdot 10^7$
1	u_x (мм)	-232.1	1.42
	u_y (мм)	-142.8	1.38
	u_H (мм)	243.7	0.90
2	u_x (мм)	-234.4	1.28
	u_y (мм)	138.2	1.24
	u_H (мм)	246.2	0.80
3	u_x (мм)	-317.4	1.30
	u_y (мм)	9.6	1.26
	u_H (мм)	448.7	0.80
4	u_x (мм)	-139.8	1.30
	u_y (мм)	-283.8	1.27
	u_H (мм)	468.0	0.80
5	u_x (мм)	-230.2	1.25
	u_y (мм)	3.3	1.22
	u_H (мм)	702.4	0.77
6	u_x (мм)	-121.8	1.31
	u_y (мм)	291.4	1.28
	u_H (мм)	472.7	0.80
7	u_x (мм)	173.1	1.29
	u_y (мм)	-245.4	1.26
	u_H (мм)	564.8	0.78
8	u_x (мм)	170.5	1.29
	u_y (мм)	245.3	1.26
	u_H (мм)	554.9	0.78
	δMO (тонн)	$61.381 \cdot 10^7$	$0.015 \cdot 10^7$

Среднее из вычисленных по смещениям каждого пункта в эпохи $t=2$, $t=3$ значение глубины z_0 центра шаровой полости $z_0 = 4946$ м. Модельное значение $z_0 = 5000$ м. Несовпадение составляет 54 метра – примерно 1% от глубины z_0 . Параметры НДС (нормальные и касательные напряжения на поверхности) вычислялись с использованием формул для модели шарового очага в упругом полупространстве. Критические значения напряжений, вызывающие разрушения камеры и прорыв магмы имеют порядок $10 \div 300 \text{ кГ} / \text{см}^2$, или $10^6 \div 30 \cdot 10^6 \text{ Па}$. Рассчитанные напряжения на поверхности достигают величины $4.6 \cdot 10^6 \text{ Па}$ в районе самого близкого к кратеру геодезического пункта 5, опасность прорыва магмы уже существует, и с каждым годом вероятность вулканического извержения будет быстро возрастать.

Таким образом, теоретическое обоснование и методическое обеспечение проведенных вычислительных экспериментов и их результаты доказывают необходимость комплексной математической обработки результатов геодезических и гравиметрических измерений с использованием полученных в диссертации уравнений наблюдений.

2. Предлагаемая методика настройки по критерию оптимальности (минимуму обобщенной дисперсии оценок определяемых величин) позволяет объективно и уверенно определять дополнительные геодезические и гравитационные параметры (коэффициенты) моделей геодинамических процессов.

Переход от статических задач геодезии к динамическим вызывает значительное увеличение размерности последних. Оцениваемый вектор $X_R(X, t)$ параметров состояний содержит параметры движений и деформаций физической поверхности Земли или, в общем случае, вектор параметров напряженно-деформированного состояния земной коры (горных пород) и параметры изменений (вариаций) во времени внешнего гравитационного поля Земли.

Включение в $X_R(X, t)$ дополнительных параметров – коэффициентов, характеризующих физические свойства геодинамических объектов и процессов, влияние внешних воздействий и т.д., приводит к еще большему увеличению размерности задачи. Для уменьшения размерности задачи использовался адаптивный фильтр Калмана-Бьюси (ФКБ). Адаптация заключается не только в том, что в процессе обработки наблюдений решается задача выбора адекватной модели, но и выполняется настройка (уточнение) некоторых параметров (коэффициентов) модели, которые не включаются в определяемый вектор $X_R(X, t)$. Более общая цель адаптации – преодоление априорной неопределенности (в структуре модели закономерностей и задании ее коэффициентов) при решении задач интерпретации наблюдений и оптимального управления как системой наблюдений, так и объектом наблюдений.

Развиваемый способ настройки параметров по критерию $\min \text{tr} K_{XR}(X, t = 3)$ (минимума суммы дисперсий оценок параметров), определяемых по адаптивному рекуррентному фильтру Калмана-Бьюси, проверялся в ходе уже описанного ранее вычислительного эксперимента 2 – динамика участка земной поверхности, расположенного вблизи действующего вулкана (рисунок 3).

Была выполнена настройка массы конуса вулкана в 1 эпоху, координат центра глубинного маскона, аппроксимирующего изменения массы в верхней части магматического очага и установлены оптимальные характеристики системы наблюдений. Для оптимизации системы наблюдений настраивался вес гравиметрических наблюдений (вес нивелирных превышений был принят обратно пропорциональным длине хода нивелирования – $p_{h_i} = 1/L_i$, где L_i –

длина хода в км) и точность измерений превышений и абсолютных значений силы тяжести.

Таблица 2 поясняет, как проходил процесс настройки радиуса маскона RK (конуса) и его массы MK в 1 эпоху. Адаптированные значения коэффициентов модели (выделены жирным шрифтом) выбирались по минимальному значению обобщенной суммы дисперсий $trK_{XR}(X, t)$.

В таблице 3 приведены результаты настройки параметров геодинамического объекта в сравнении с их модельными значениями.

ТАБЛИЦА 2 - Настройка радиуса маскона RK и его массы MK в 1 эпоху.

$RK(t=1)$ в метрах	488,0	489,0	489,5	490,0	490,5	491,0	492,0
$MK(t=1)$ в 10^9 тонн	1,280	1,288	1,292	1,296	1,300	1,304	1,312
$trK_{XR}(X, t)$	1,4864	1,4837	1,4830	1,4827	1,4829	1,4835	1,4858

Важно знать расположение верхнего магматического очага. Координаты его центра также были настроены по критерию минимума суммы дисперсий оценок параметров (см. таблицу 3). При извержении вулкана не все вещество остается в конусе вулкана и на его поверхности, т.к. его часть выбрасывается в атмосферу. Процент остающегося на конусе вещества в разные эпохи (таблица 3) был настроен по тому же критерию.

Аномалия силы тяжести для 2-й, 3-й и 4-й эпох вызвана изливанием вещества из магматической камеры и увеличившейся массой конуса вулкана. Интерес для вулканологов представляют параметры W_0 и ΔB экспоненциального закона расхода магмы.

$$W(t) = W_0 e^{-W_0 t / \Delta B}, \quad (24)$$

где W_0 - начальный расход магмы; ΔB - избыток магмы в очаге; t - время от начала извержения. Они были рассчитаны по результатам математической обработки нивелирных превышений и гравиметрических данных с учетом закона (24) и представлены в таблице 3.

В эксперименте 4 по изучению локального напряженно-деформированного объекта (раздел 2) также выполнялась настройка, но не параметров объекта, а сил внешних воздействий. В качестве локального геодинамического объекта выбрана модель плотины, работающая в условиях плоской деформации (рисунок 7). Задача сводится к расчету НДС пластины в форме прямоугольной трапеции толщиной 1 метр, как реакции на воздействие давления воды и напора льда.

Направления векторов сил возмущающих внешних воздействий составляют 90 градусов к боковой стороне и лежат в плоскости пластины. Значения этих сил в период между первым и вторым циклами следующие: $F_3 = 0.3067$ МН, $F_6 = 0.64$ МН, $F_{10} = 1.28$ МН. В период между вторым и

третьим циклами по прогнозу метеорологов ожидается увеличение значений сил на 25%.

ТАБЛИЦА 3 - Настроенные и модельные параметры

Параметры модели геодинамического объекта	Значения	Эпоха		
		2	3	4
Координата X центра глубинного маскона (м)	Модельные	6000	6000	6000
	Настроенные	5940	5960	5980
Координата Y центра глубинного маскона (м)	Модельные	0	0	0
	Настроенные	-10	0	0
Координата Z центра глубинного маскона (м)	Модельные	-5000	-5000	-5000
	Настроенные	-4990	-5000	-5000
Часть оставшегося на конусе вещества (%)	Модельные	70	70	90
	Настроенные	69	70	89
Масса конуса вулкана в 1 эпоху (10^9 тонн)	Модельные	1.377		
	Настроенные	1.296		
Начальный расход магмы W_0 (тонна/секунда)	Модельные	1042		
	Настроенные	1043		
Избыток магмы в очаге ΔB (тонн)	Модельные	$1.12 \cdot 10^7$		
	Настроенные	$1.11 \cdot 10^7$		

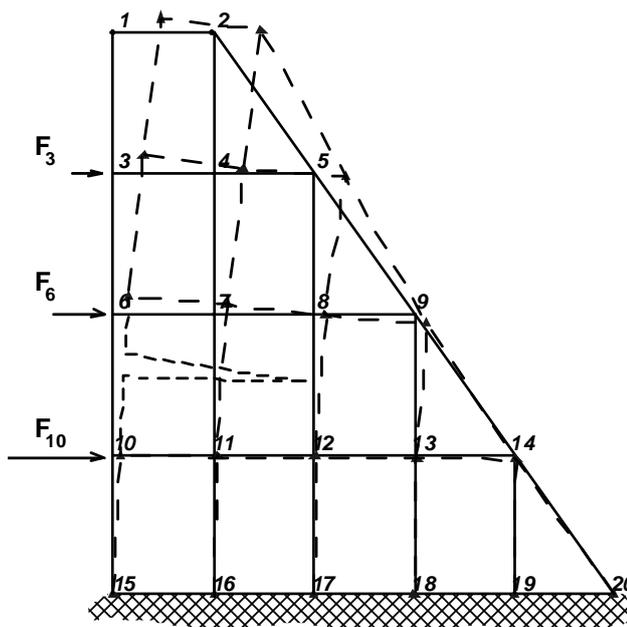


Рисунок 7 - Модель геодинамического объекта – плоская пластина

Но в ходе вычислительного эксперимента определился другой процент увеличения сил внешних воздействий – тот, который был заложен при расчетах модельных значений измерений третьего цикла. Это было выполнено путем адаптации (настройки) модели по критерию $\min trK_{XR}(X, t = 3)$ для совокупности измерений трех циклов. В результате было установлено, что в период со 2 по 3 цикл произошло увеличение сил воздействия не на 25%, как прогнозировалось, а на 20% (таблица 4) – как изначально было заложено при моделировании.

Таблица 4. Прогнозное увеличение сил воздействия и соответствующие значения μ и trK_{XR}

Увеличение сил	10%	12.5%	15%	17.5%	20%	22.5%	25%
$\mu (t=3) (мм)$	0.264	0.232	0.207	0.190	0.184	0.188	0.203
$trK_{XR}(X, t = 3) (мм^2)$	2.205	1.795	1.497	1.326	1.298	1.432	1.745

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили возможность настройки некоторых дополнительных геодезических и гравитационных параметров (коэффициентов) моделей геодинамических процессов и объектов по критерию минимума суммы дисперсий определяемых величин.

3. Разработанные новые технологические решения и их программная реализация обеспечивают выполнение оперативной комплексной математической обработки и пространственно-временной интерпретации больших массивов геодезических и гравиметрических наблюдений. При этом достигается более наглядная и информативная, чем раньше, визуализация полей смещений и деформаций по дискретным данным о движениях пунктов, появляются новые возможности для оперативного решения задач прогноза, снижения риска и уменьшения последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера.

Для проверки и уточнения алгоритмов и создания элементов информационной технологии изучения геодинамических объектов и процессов по пространственно-временным рядам геодезических и гравиметрических наблюдений были разработаны программы в различных средах программирования. Моделирование геодинамических объектов, моделирование пространственно-временных рядов комплексных геодезических и гравиметрических наблюдений, их математическая обработка, статистический анализ и наглядное представление результатов вычислительных экспериментов выполнялись по авторским программам в средах программирования Delphi и Matlab. Так же использовались электронные таблицы Excel и пакеты прикладных программ (Maple, Derive, Mathcad, Mathematica, StatGraphics, Matrixer, Surfer, Elcut, Microdem и др.)

Система инженерных и научных расчетов MATLAB (матричная лаборатория) широко распространена во всем мире и доказала свою эффективность в самых различных сферах науки и техники. Ориентация на

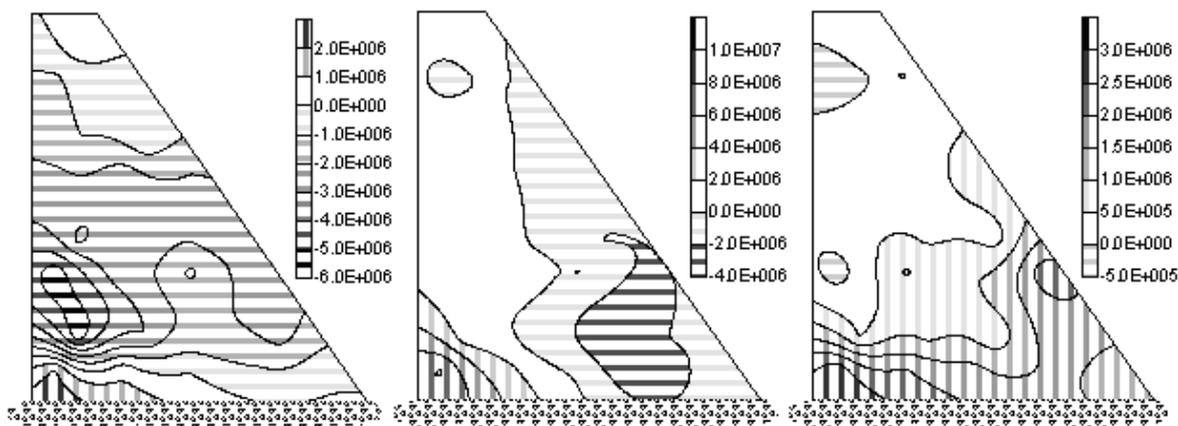


Рисунок 9. Поля напряжений ГДС по расчетным значениям перемещений (слева направо - σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy}).

Иначе будут изображаться поля напряжений по оценкам компонентов тензоров (рисунок 10), которые получены в результате оценивания напряженно-деформированного состояния пластины по наблюдениям в смоделированной геодезической сети. По этим изображениям экспертно определяется введенная в модель ГДС трещина, ее расположение, протяженность, то есть уточняется структура исследуемого объекта.

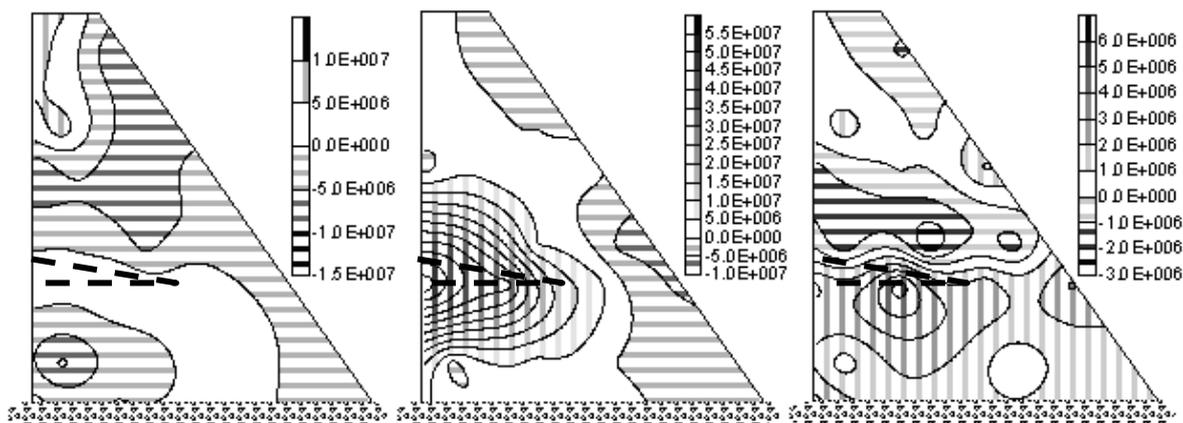


Рисунок 10 Поля напряжений ГДС по геодезическим наблюдениям (слева направо - σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy}). Штриховой линией показана локализация трещины.

Такая визуализация параметров НДС, выполненная в результате обработки и интерпретации натуральных геодезических наблюдений на реальных динамических объектах, позволит эксперту существенно уточнять структуру ГДС по сравнению с проектными аналитическими расчетами, в частности, наличие трещин и пустот.

Разработанные и представляемые в диссертации элементы технологии изучения геодинамических процессов включают некоторые процедуры анализа результатов повторного нивелирования по градиентам. Это показано на примере результатов нивелирования 1 класса по линии Кызыл – Кош-Агач (рисунок 11), выполненного Верхнеенсейским АГП в 2002-2005 годах, в обработке которых принимал участие автор диссертации.

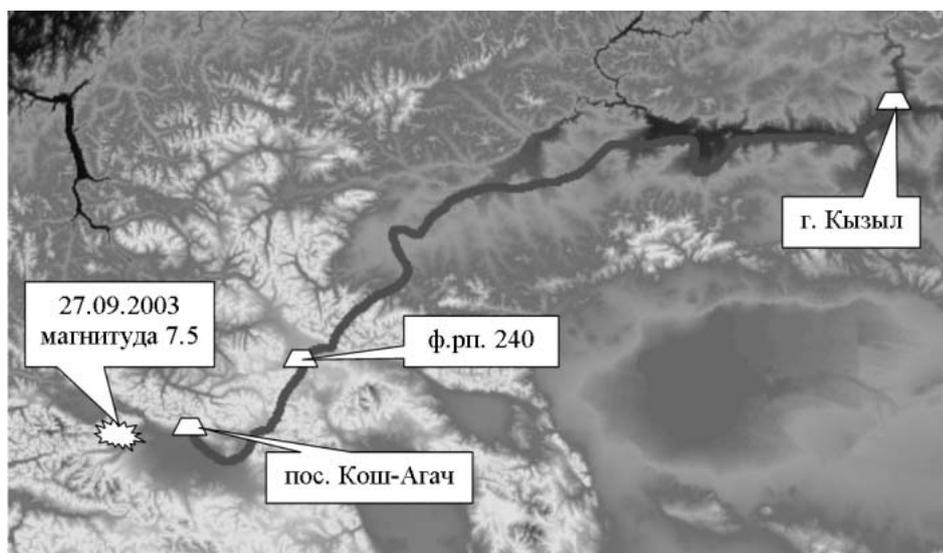


Рисунок 11 - Линия нивелирования 1 класса Кызыл – Кош-Агач

Был выполнен графический анализ горизонтальных движений и полей деформаций земной поверхности Горного Алтая по результатам GPS-наблюдений, проводимых с 2000 года ежегодно сотрудниками Института геофизики СО РАН.

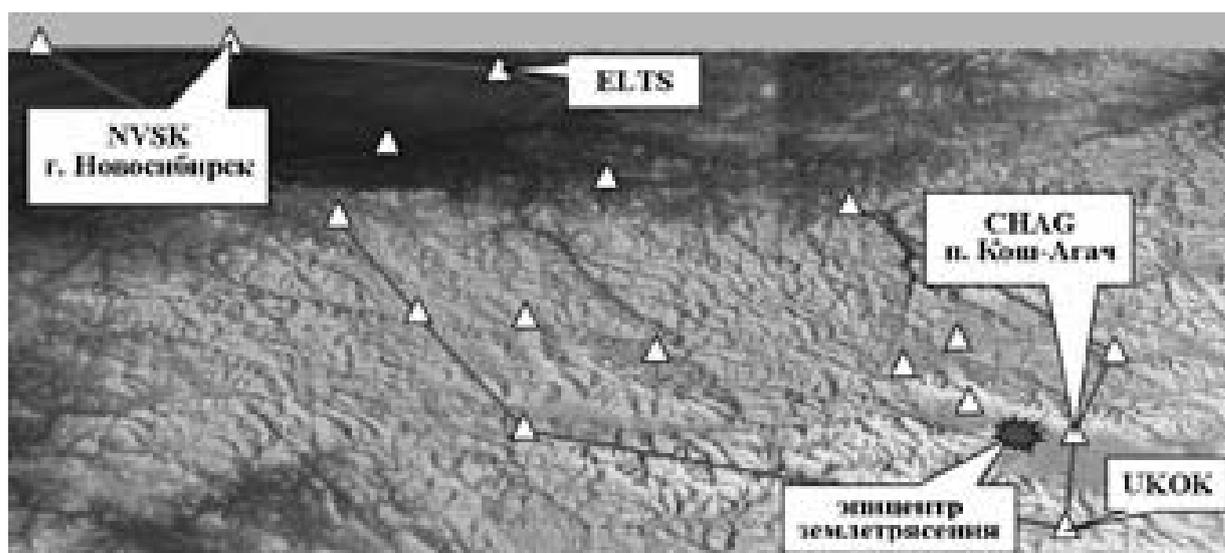


Рисунок 12 - Алтайская GPS-сеть

Графический анализ данных о горизонтальных смещениях выполнялся с целью определения наличия деформационного предвестника места Чуйского землетрясения 27 сентября 2003 года (магнитуда 7.5). Эпицентр землетрясения - горная перемычка между Чуйской и Курайской впадинами (рисунок 12). Ближайший к эпицентру крупный населенный пункт - п. Кош-Агач.

На рисунке 13 изображено автоматическое (программное) разбиение GPS-полигона на конечные элементы с учетом плотности пунктов сети. На рисунке 14 дана картосхема векторов горизонтальных смещений. Интересными результатами этой визуализации являются видимое

закручивание по часовой стрелке центральной части GPS-полигона и относительно большое смещение в направлении северо-восток южной части.

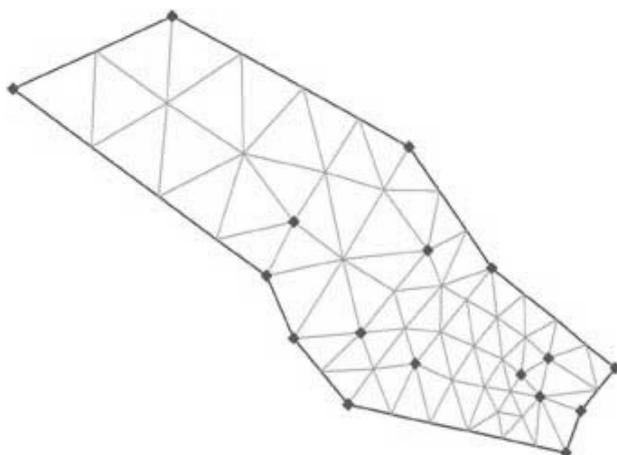


Рисунок 13 - Разбиение на конечные элементы

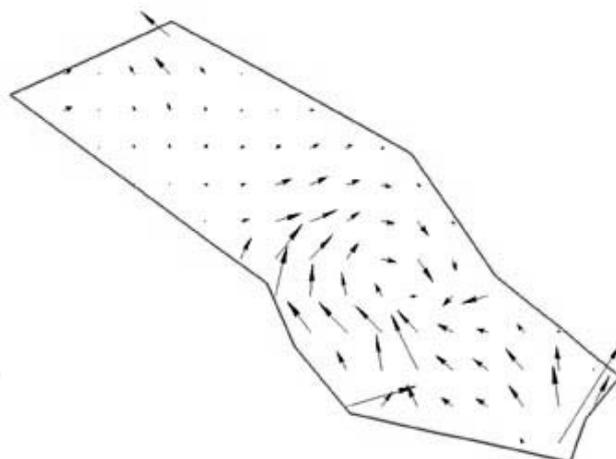


Рисунок 14 - Векторы смещений

Стрелки на рисунке 15 отражают геометрическую интерпретацию ориентации главных осей деформаций и их величин, которые получены по значениям компонентов тензора деформации. Стрелки внутрь предоставляют судить о степени сжатия района, стрелки наружу - о растяжении. Из результатов интерпретации следует интересный вывод – имеется существенное сжатие южной части территории вдоль направления север-северо-восток.

Рисунки 16 – 18 являются визуализацией полей деформаций. На всех трех рисунках контрастом цвета четко выделяется зона на юге GPS-полигона. Особенно это видно на рисунке 18. Сопоставление этих рисунков с рисунком 12 отчетливо показывает совпадение северного угла аномальных по цвету зон с эпицентром землетрясения.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в GPS-наблюдениях 2000 - 2003 годов имела информация о деформационном предвестнике Чуйского землетрясения. Это еще раз подтверждает важность геодезического метода наблюдений геодинамических процессов.

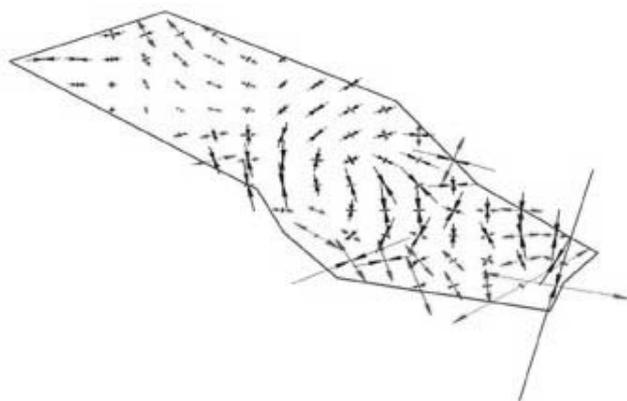


Рисунок 15 - Тензоры деформаций

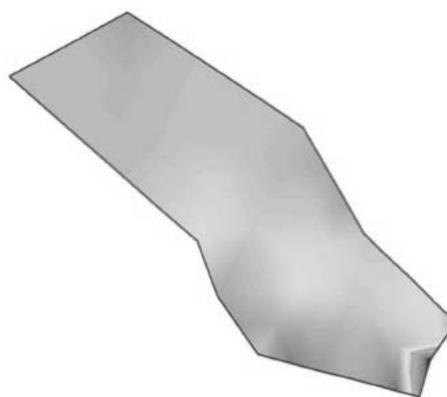


Рисунок 16 - Деформация ϵ_{xx}

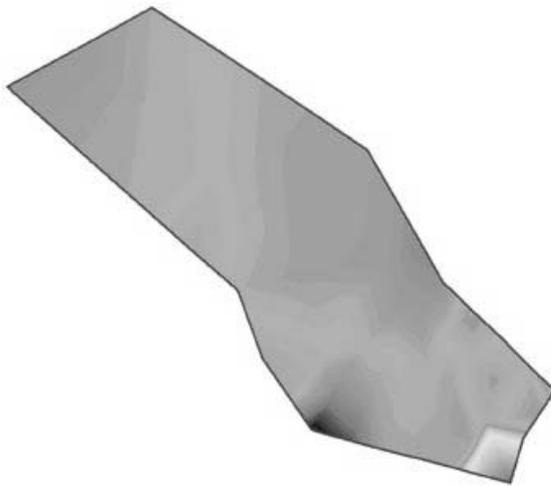


Рисунок 17 - Деформация ε_{yy}

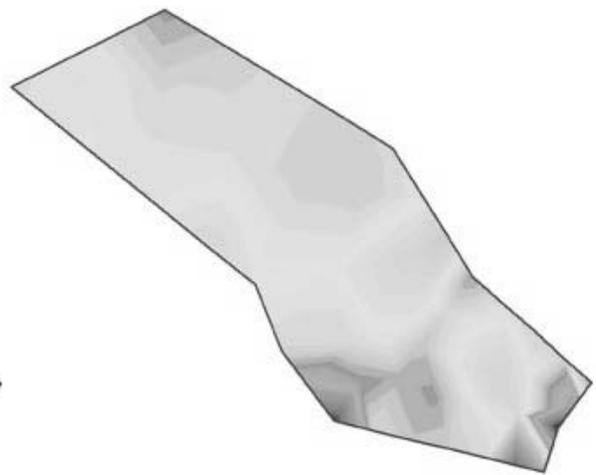


Рисунок 18 - Деформация γ_{xy}

При разработке моделей землетрясений имеет важнейшее значение исследование полей постсейсмических смещений и деформаций. В связи с этим был сделан графический анализ полей смещений и деформаций земной поверхности Горного Алтая, происшедших после землетрясения – постсейсмических.

На рисунке 19 кроме изображения исследуемого района (синий четырехугольник) показано положение нодальной плоскости (красная прерывистая линия), вдоль которой произошел разрыв. Вдоль этой линии располагаются эпицентры афтершоков. Поле горизонтальных смещений иллюстрирует рисунок 20. Изображение изменения формы и деформированной границы после землетрясения дано на рисунке 21.

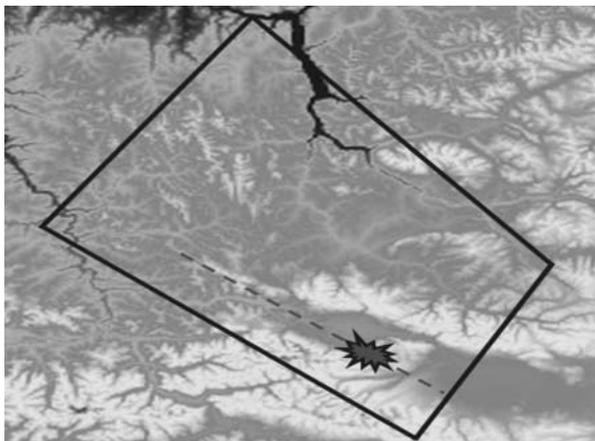


Рисунок 19 - Исследуемый район постсейсмических деформаций

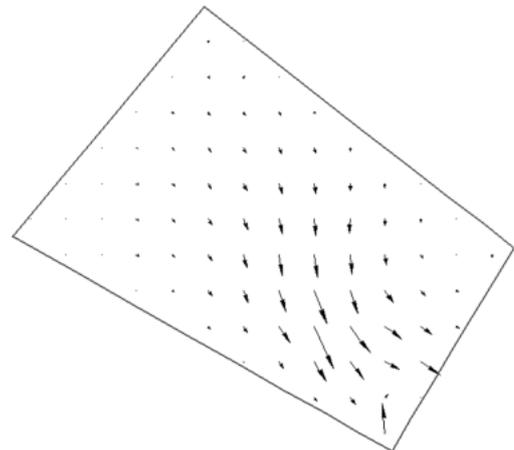


Рисунок 20 - Поле горизонтальных смещений

Графическая интерпретация тензоров деформаций представлена рисунком 22. Стрелки наружу – растяжение, стрелки внутрь – сжатие.

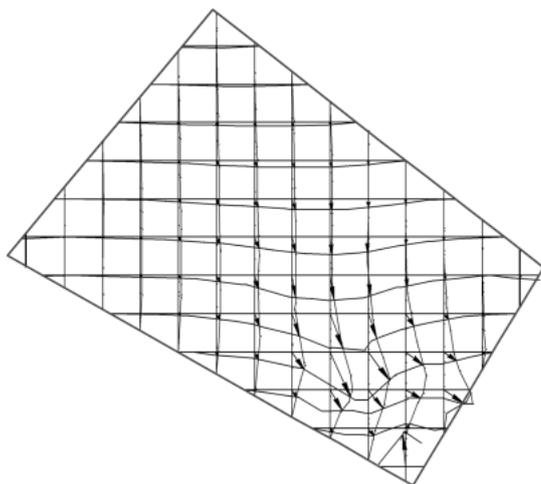


Рисунок 21 - Измененная форма и деформированная граница

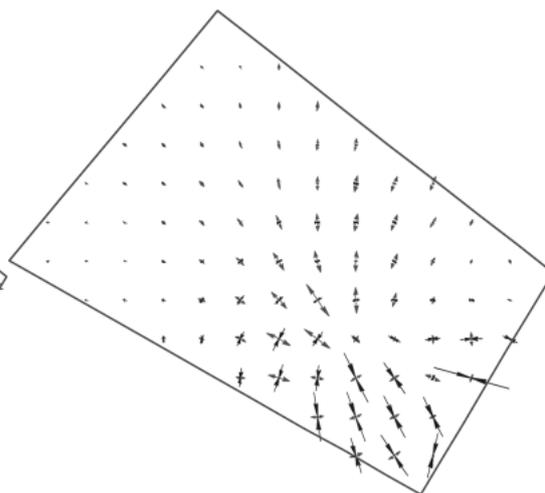


Рисунок 22 - Тензоры деформаций

На рисунке 23 показано поле абсолютных значений векторов смещений $\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}$. Замечаем соответствие зоны самых больших значений смещений зоне эпицентров землетрясения и афтершоков вдоль нодальной плоскости (рисунок 19). Рисунки 24 – 26 иллюстрируют поля деформаций.

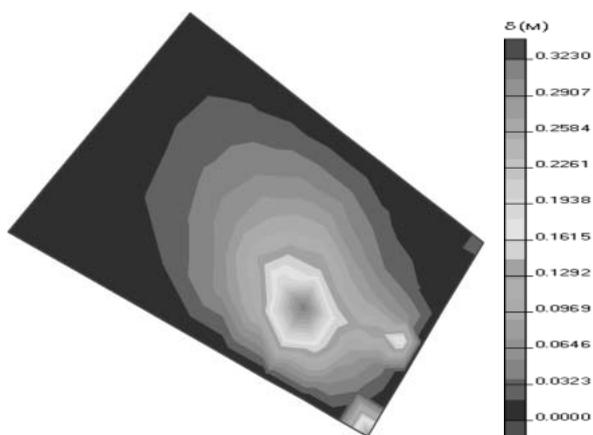


Рисунок 23 - Поле величин смещений δ

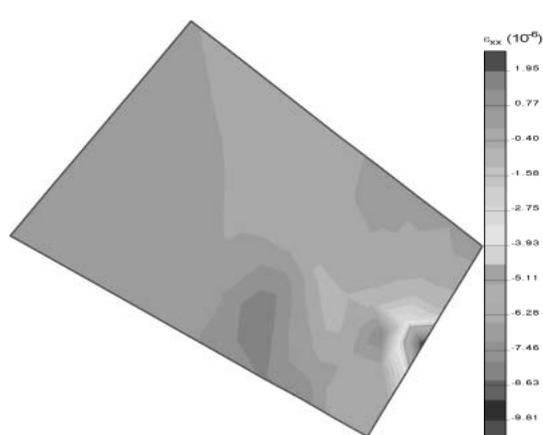


Рисунок 24 - Поле деформации ϵ_{xx}

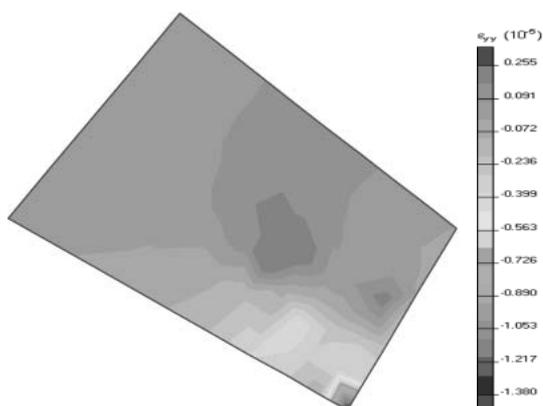


Рисунок 25 - Поле деформации ϵ_{yy}

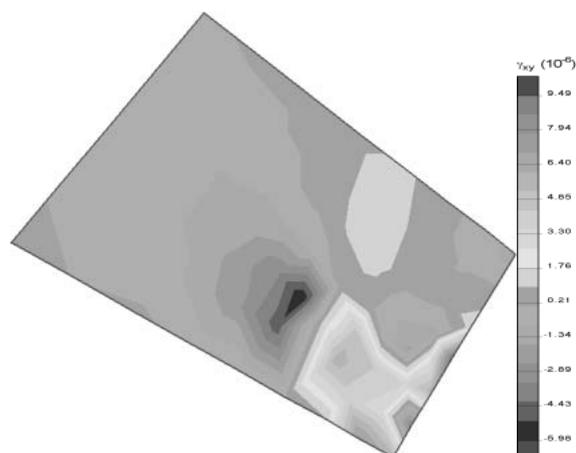


Рисунок 26 - Поле деформации γ_{xy}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведения диссертационных исследований получены следующие научные результаты:

1. Реализован принцип совместной математической обработки геодезических и гравиметрических измерений с включением в состав оцениваемого вектора параметров переменных масс геодинамического объекта. При этом обеспечивается оптимальное решение задачи определения закономерностей движений, текущих и прогнозных оценок геодинамических объектов и характеристик их точности в виде ковариационных матриц. Предлагается использовать полученные в диссертации уравнения наблюдений.
2. Разработана методика настройки по критерию оптимальности (минимуму обобщенной дисперсии оценок определяемых параметров). Она позволяет объективно определять дополнительные геодезические и гравитационные параметры (коэффициенты) модели динамики объекта, которые расширяют возможности применения геодезии и гравиметрии при изучении геодинамических процессов.
3. Разработаны технологические решения и программное обеспечение, позволяющие выполнять оперативную комплексную математическую обработку и пространственно-временную интерпретацию больших массивов геодезических и гравиметрических наблюдений. При этом обеспечиваются более наглядная и информативная, чем раньше, визуализация полей смещений и деформаций по дискретным данным о движениях пунктов, новые возможности для оперативного решения задач прогноза, снижения риска и уменьшения последствий геодинамических катастроф природного и техногенного характера.

Таким образом, цель диссертационной работы и предусматриваемые ею задачи реализованы.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- расширены возможности поиска решений обратных некорректных задач геофизики по разнородным данным.
- разработанные методики изучения геодинамических процессов на основе моделирования меняющихся во времени геодезических и гравитационных параметров позволяет решать межотраслевые научно-технические проблемы исследований как на техногенных геодинамических полигонах в местах разработки полезных ископаемых, строительстве и эксплуатации крупных инженерных сооружений, так и в районах с повышенной природной сейсмоструктурной опасностью (вулканы, зоны сочленения синклиналиных образований и платформ и др.).
- разработанные технологические решения позволят принимать более обоснованные управленческие решения по обеспечению устойчивого развития территорий, в том числе экологического равновесия,

снижению риска и уровня последствий катастроф природного и техногенного характера, что имеет огромное социальное и экономическое значение для многих регионов России.

Проведенные диссертационные исследования позволяют обозначить перспективы дальнейшего совершенствования комплексных исследований по изучению геодинамических явлений природного и техногенного характера. В частности, требуют проведения специального изучения вопросы включения в этап совместной математической обработки геодезических и геофизических наблюдений различного пространственно-временного масштаба. Их реализация потребует, по-видимому, выявление возможности автоматизированной идентификации структуры геодинамических объектов, с учетом их прочностных, физических и механических характеристик для принятия решений по управлению геодинамической ситуацией. Математическая обработка и интерпретация результатов должна вестись в реальном времени с автоматической регистрацией развивающихся деформаций и связанных с ними изменений геофизических полей и пространственного положения опорных реперов. По-видимому, потребуются расширить класс математических моделей, описывающих структуру, меняющиеся гравитационное поле и напряженно-деформированное состояние геодинамических объектов.

По теме диссертации опубликовано 46 работ, в том числе следующие, раскрывающие ее основное содержание:

Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ

- 1 Мазуров, Б.Т. Математическое обеспечение идентификации движений и напряженно-деформированного состояния сооружений и объектов инженерной геодинамики по геодезическим наблюдениям / А.А. Крамаренко, Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. № 5. – С. 3 – 13.
- 2 Мазуров, Б.Т. Вычислительный эксперимент идентификации движений и напряженно-деформированного состояния сооружений и объектов инженерной геодинамики по геодезическим наблюдениям / А.А. Крамаренко, Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. - №6. – С. 3 – 14.
- 3 Мазуров, Б.Т. Анализ вертикальных движений по результатам нивелирования линии Кызыл - Кош-Агач / Б.Т. Мазуров, С.С. Титов // Геодезия и картография. - 2006. - №4. - С. 53 - 57.
- 4 Мазуров, Б.Т. Совместная математическая обработка разнородных комплексных геодезических и геофизических наблюдений за движениями земной поверхности и изменениями аномальных масс / Б.Т. Мазуров // Изв. вузов. Горный журнал. – 2006. - № 4. - С. 99 – 104.
- 5 Мазуров, Б.Т. Модель вертикальных движений земной поверхности и изменений гравитационного поля в районе действующего вулкана / Б.Т. Мазуров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2007. - № 2. - С. 97 - 106.

6 Мазуров, Б.Т. Модель системы наблюдений за вертикальными движениями земной поверхности и изменениями гравитационного поля в районе действующего вулкана / Б.Т. Мазуров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2007. - № 3.

7 Мазуров, Б.Т. Совместная математическая обработка и интерпретация нивелирных и гравиметрических наблюдений за вертикальными движениями земной поверхности и изменениями гравитационного поля в районе действующего вулкана / Б.Т. Мазуров // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2007. - № 4.

8 Мазуров, Б.Т. Поля деформаций Горного Алтая перед Чуйским землетрясением. / Б.Т. Мазуров // Геодезия и картография. – 2007. - № 3. - С. 48 – 50.

9 Мазуров Б.Т. Компьютерная визуализация полей постсейсмических смещений и деформаций. / Б.Т. Мазуров // Геодезия и картография. – 2007. - № 4. - С. 51 – 53.

Монография

10 Идентификация движений и напряженно-деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям: монография / В.А. Середович, В.К. Панкрушин, Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.Ф. Ловягин; под общ. ред. В.К. Панкрушина; СГГА. - Новосибирск, 2004. – 356 с.

Публикации по итогам международных конференций под эгидой международного союза геодезистов (FIG) (на английском языке):

11 Boris T. Mazurov, Vladimir A. Serevovich, Venyamin K. Pankrushin, Mathematical Modeling and Identification of the Stressed-deformed State of Geodynamic Systems by Spatio-temporal Series of Combined Geodetic and Geophysical Observations in the Light of Prediction of Natural and Technogenic Catastrophes, FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27, 2004.

12 Mazurov B.T., Pankrushin V.K. Models Parameter Adaptation of Geodynamic Objects and Observation Systems with a Kalman-Bucy Filter. Fifth International Symposium "Turkish-German Joint Geodetic Days" Berlin, Germany, March 29-31, 2006. С.62 - 66.

Публикации в других изданиях

13 Мазуров, Б.Т. Визуализация результатов идентификации напряженно-деформированного состояния геодинамических систем / Б.Т. Мазуров // Сб. материалов конф. «Фотограмметрические технологии в XXI веке». - - Новосибирск: СГГА, 2003. - С. 47-52.

14 Мазуров, Б.Т. Идентификация напряженно-деформированного состояния геодинамических систем на основе комплексных геодезических и геофизических наблюдений / Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин, В.А. Середович // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Тр. междунар. конф. - Новосибирск: Ин-т горн. дела СО РАН, 2004. - С. 175 - 183.

15 Мазуров, Б.Т. Деформационные предвестники Чуйского землетрясения 2003 года / Б.Т. Мазуров // Сб. материалов междунар. научно-техн. конф., посвящ. 225-летию МИИГАиК, Москва, 2004. -М., 2004. - С. 447 - 451.

- 16 Мазуров, Б.Т. Математическое моделирование и идентификация напряженно-деформированного состояния геодинамических систем в аспекте прогноза природных и техногенных катастроф / Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин, В.А. Середович // Вестн. Сиб. гос. геодез. акад. / СГГА.- 2004. - Вып.9. – С.30-35.
- 17 Мазуров, Б.Т. Идентификация напряженно-деформированного состояния и поворотных движений геодинамических систем по наземным и спутниковым наблюдениям / В.А. Середович, В.К. Панкрушин, Б.Т. Мазуров // – Сб. материалов VIII междунар. научно-практ. конф. Geoinfocad, Франция, Ницца, 12-19 марта 2004 г.- Новосибирск: СГГА, 2004, -С.11-14.
- 18 Мазуров, Б.Т., Математическое моделирование и идентификация напряженно-деформированного состояния геодинамических систем по пространственно-временным рядам комплексных геодезических и геофизических наблюдений / В.А. Середович, В.К. Панкрушин, Б.Т. Мазуров // Тр. междунар. конф. СУЧАСНІ ДОСЯГНЕННЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ НАУКИ ТА ВИРОБНИЦТВА, Збірник наукових праць Західного/Геодезичного Товариства. – Львів: Ліга-Прес, 2004. - С. 409-416.
- 19 Мазуров, Б.Т. Интерпретация комплексных геодезических и геофизических наблюдений за напряженно-деформированным состоянием геодинамических систем / Ю.И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин, В.А. Середович // Проблемы и перспективы развития горных наук. Тр. междунар. конф. - Новосибирск: Ин-т горн. дела СО РАН, 2005. - С. 194 - 199.
- 20 Мазуров, Б.Т. Идентификационный эксперимент: построение физико-математической модели динамики земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области / Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин // Сб. материалов Междунар. выставки и науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2005». – Новосибирск, 2005.
- 21 Мазуров, Б.Т. Идентификационный эксперимент: моделирование системы наблюдений за динамикой земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области / Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин // Сб. материалов Междунар. выставки и науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2005». – Новосибирск, 2005.
- 22 Мазуров, Б.Т. Идентификационный эксперимент: совместная математическая обработка и интерпретация нивелирных и гравиметрических наблюдений за динамикой земной поверхности и гравитационного поля в вулканической области / Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин // Сб. материалов Междунар. выставки и науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2005». – Новосибирск, 2005.
- 23 Мазуров, Б. Т. Математическая обработка комплексных геодезических и геофизических наблюдений в условиях извлечения и перемещения больших объемов руды и пород / Б.Т. Мазуров // Проблемы и перспективы развития горных наук. Тр. междунар. конф. - Новосибирск: Ин-т горн. дела СО РАН, 2005. - С. 184 - 193.

- 24 Мазуров, Б.Т. Использование фильтра Калмана-Бьюси при настройке параметров моделей геодинамических объектов и систем наблюдений / Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Тр. междунар. конф. - Новосибирск: Ин-т горн. дела СО РАН, 2006. - С. 102 – 111.
- 25 Мазуров, Б.Т. Моделирование и идентификация геодинамического объекта в вулканической области по комплексным нивелирным и гравиметрическим наблюдениям / Б.Т. Мазуров // Вестник СГГА, 2006. Вып. 11. - С. 84 – 94.
- 26 Мазуров, Б.Т. Физико-математическое моделирование деформационных процессов готовящегося вулканического извержения по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям / Б.Т. Мазуров, В.К. Панкрушин // Сб. материалов междунар. науч. конгр. «ГЕО-СИБИРЬ-2006».- Новосибирск, 2006. - Т.3, Ч.2. - С. 141-146.