

На правах рукописи

АРДЮКОВ ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

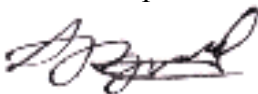
**ПОЛЯ СМЕЩЕНИЙ И ПАРАМЕТРЫ
СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПО GPS ДАННЫМ
(НА ПРИМЕРЕ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ,
ГОРНЫЙ АЛТАЙ)**

25.00.10 - геофизика, геофизические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск 2009



Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Тимофеев Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты:

профессор, доктор технических наук
Колмогоров Вячеслав Георгиевич

кандидат физико-математических наук
Кучай Ольга Анатольевна

Ведущая организация:

Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук, Иркутск

Защита состоится 10 сентября 2009 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 003.068.03 при Учреждении Российской академии наук Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, в конференц-зале.

Адрес: пр-т Ак. Коптюга, 3, г. Новосибирск, 630090

Факс: 8(383)333-25-13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИНГГ СО РАН.

Автореферат разослан 7 августа 2009 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета,
д.т.н.



И.Н. Ельцов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования. Поля смещений в зоне сильного землетрясения, дислокационные модели смещений земной коры.

Актуальность. Появление в последние десятилетия различных модификаций методов космической геодезии субмиллиметровой точности позволило использовать результаты этих измерений для решения задач геофизики. Полученные скорости смещения на различных континентах дают количественные оценки для теории тектоники плит, эффектов внутриконтинентальных смещений и деформаций, связанных с сейсмическим процессом. Картина смещений для Азии до недавнего времени строилась по геологическим данным [Zonenshain & Savostin, 1981; Peltzer, 1988; Peltzer&Tapponnier, 1988; Peltzer&Saucier, 1996], а в последние десятилетия методами GPS геодезии получены количественные оценки для Китая, Монголии и Тянь-Шаня [Зубович, 2006, Calais et al., 2003]. В этих результатах также отражаются процессы косейсмических подвижек, постсейсмических течений и раздвижение рифтовой впадины оз. Байкал [Саньков и др., 1999, 2005; Calais et al., 2006]. Для территории Горного Алтая, связывающей отдельные регионы центральной Азии до 2000 г. таких измерений не проводилось. Определение величины косейсмических смещений, их распределение в пространстве и во времени является важной задачей геофизики и позволяет разрабатывать модели землетрясений [Гольдин, 2004, 2005; Тимофеев 2006; Добровольский, 1991]. Данные о косейсмических смещениях получены методами космической геодезии в различных регионах Земли [Burgmann et al., 2001; Kogan et al., 2003; Стеблов, 2004; Прытков, 2008]. Изучение поля скоростей смещений по сети, охватывающей регион, позволяет переходить к ряду классических задач геофизики - определению глубины разрыва, оценкам деформаций, сейсмического момента и магнитуды землетрясения.

Цель работы: установить закономерности распределения и природу полей смещений и деформаций Горного Алтая, связанных с сильным землетрясением и современными тектоническими силами.

Задача работы: определить параметры Чуйского землетрясения на основе экспериментальных GPS данных, полученных по сети Горного Алтая, выделить тектоническую составляющую современных движений Горного Алтая.

Решение задачи проводилось в несколько этапов:

1. Используя имеющуюся геолого-геофизическую информацию по Алтае-Саянскому региону, определена конфигурация сети GPS-измерений.
2. Проводятся ежегодные GPS-измерения по Алтае-Саянской сети в соответствии с технологией, принятой в мировой практике.
3. Определено поле 3D смещений для региона Горный Алтай и его окружения, в периоды перед, в момент и после Чуйского землетрясения.

4. Проведен анализ существующих моделей смещений земной коры Азии.
5. Смоделированы 2D смещения, с использованием упругой модели.
6. По экспериментальным данным определены параметры сейсмического разрыва (величина подвижки, глубина разрыва и его протяженность, сейсмический момент и магнитуда землетрясения).
7. Смоделированы 3D смещения, проведено сравнение с экспериментально полученными полями.

Фактический материал, методы исследований и аппаратура

1. GPS данные постоянной станции NVSK за период 2000-2008 гг. (Новосибирск, ИНГГ СО РАН, Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Запreeва Е.А.)
2. GPS данные 25 постоянных мировых станций международной геодинамической сети IGS, предоставленные центром хранения и обработки GPS данных SOPAC (USA).
3. Экспериментальные GPS данные, полученные при активном участии автора в период ежегодных полевых экспедиций в регионе Горный Алтай, с 2000 г. по 2008 г.

4. Сейсмологическая информация, полученная по району Горного Алтая в Геофизической службе СО РАН и мировых центрах обработки сейсмологической информации USGS (USA), за период 2000 – 2008 гг.

Теоретическими основами решения научной задачи являются: модели плитного движения Евразии (NUVEL-NNR-1A, APKIM2000, AR-IR-2006); теория преобразования координат – геоцентрическая – географическая – локальная; теория упругой отдачи Рейда; статическая задача теории упругости для разломов со смещением по простиранию, при различных начальных и граничных условиях (2D); аналитическое 3D-решение с разнонаправленными смещениями по разрыву.

Основным методом исследования является эксперимент, построенный на измерениях высокоточной аппаратурой GPS на 20 пунктах, расположенных в регионе Горный Алтай, с привлечением материалов сейсмологических и геоморфологических исследований; анализ GPS данных с применением алгоритма уравнивания сети методом наименьших квадратов, применяемым для оценки орбитальных параметров спутников, фазовых неоднозначностей и ковариационных матриц положений станций, используемых далее для оценки смещений станций с помощью фильтра Кальмана; метод сравнительного анализа полученных результатов с известными данными радарной спутниковой съемки InSAR.

Экспериментальные данные были получены с помощью комплекта двухчастотных GPS-приемников Trimble 4700 и Sokkia Radian GePos 24.

Для обработки данных использовался набор программных средств: RemoteController, Gpload, GPSurvey (Trimble software, 2000); Gamit/GLOBK (King, 2000; T.Herring, 1995); Matlab 7.0.1 R14 SP1 (The MathWorks Inc., 1984-2008); пакет обработки для Matlab Coulomb 3.1.09 (Shinji Toda, Jian Lin, Ross Stein, Volkan Sevilgen, 2009) с использованием ОС Windows, Linux RedHat.

Защищаемые научные результаты:

1. Впервые для Горного Алтая получено поле 3D-смещений перед, в момент и после крупного землетрясения (Чуйское землетрясение), определены особенности полей на различных этапах, выделена тектоническая составляющая современных движений Горного Алтая (2 мм/год на СЗ).

2. Используя упругую модель смещений и экспериментальные GPS данные, полученные в зоне землетрясения, получена оценка глубины сейсмического разрыва (до 15 км), протяженности разрыва (140 км), величины смещений на разрыве (2 м), сейсмического момента (10^{20} Н·м) и магнитуды (7.2) Чуйского землетрясения.

Научная новизна и личный вклад

Впервые в Западной Сибири построена и запущена базовая GPS станция NVSK (DOMES 12319M001) в Новосибирске, метрологического уровня, введенная в международную геодинамическую сеть постоянных станций IGS с 2000 г. На станции впервые получены значения смещения в географических координатах, относительно центра Земли: $-2,27 \pm 0,06$ мм/год на север, $25,72 \pm 0,09$ мм/год на восток, $-0,13 \pm 0,19$ мм/год по высоте. С привлечением данных этой станции протестированы модели плитного вращения Евразии NUVEL-NNR-1A и APKIM2000, получены отклонения (± 2 мм) от существующих моделей. С привлечением данных по постоянным станциям Урала и Сибири построена модель плитного движения Евразии AR-IR-2006, с минимальным отклонением ($\pm 0,2$ мм) от экспериментальных данных севера Евразии.

Впервые получены данные по 3D-смещениям в эпоху перед крупным землетрясением на Горном Алтае (2000-2003 гг.), в которых выявлены аномалии в распределении скоростей современных движений земной коры. Изменение ориентации скоростей горизонтальных движений выделено в зоне будущего землетрясения. В поле скоростей Горного Алтая проявляется как компонента СВ смещения, проявляющаяся на пунктах Тибета (Лхаса), западного Китая (Урумчи) и северо-западной Монголии, так и компонента СЗ смещения, отмеченная также на прилегающей территории Восточного Казахстана. Величины смещений для территории Горного Алтая составляют $0.2 \div 4$ мм в год, и только на юге скорости возрастают до $5 \div 10$ мм.

Впервые получено поле косейсмических смещений для Горного Алтая (2003-2004 гг.), что позволило выделить горизонтальные смещения до 350 мм в 15 км от эпицентра Чуйского землетрясения. Вертикальные смещения пунктов составили $10 \div 30$ мм. Распределения смещений после землетрясения (правосторонний сдвиг в эпицентральной части), затухание смещений с увеличением расстояния от разрыва, особенности поля скоростей до события приводят к выбору модели упругой отдачи для описания смещений в эпицентральной зоне. Экспериментальные результаты и 2D-модельные соотношения позволили определить: ориентацию разрыва ($140^\circ \text{ N} \pm 15^\circ$), величину смещения по линии разрыва (2 метра), глубину разрыва (от 5 до 15

км в разных частях эпицентральной зоны); сделать оценку сдвиговых напряжений в 4 МПа. 3D-моделирование позволило оценить: протяженность разрыва (140 км), сейсмический момент (10^{20} Н·м) и магнитуду (7,2) Чуйского землетрясения. Измеримые смещения земной коры охватывают территорию с размерами в несколько сотен километров. Деформации земной коры, снятые при землетрясении в зоне до 100 км достигают единиц на 10^{-6} . Выделено поле постсейсмических смещений Горного Алтая (2004-2007 гг.). Впервые получено поле тектонических смещений Горного Алтая (2000-2007 гг.).

Научная и практическая значимость

Впервые получены значения координат и скоростей пунктов геодинамической сети Алтая, являются метрологической основой для развития геофизических исследований. Полученные результаты могут использоваться для уточнения и построения моделей смещений и деформирования зоны активной деформации юга Сибири, развития теории прогноза землетрясений, структурных исследований земной коры.

Впервые полученные координаты и скорости пунктов, являясь высокоточной основой, могут быть использованы для повышения точности рядовых геодезических измерений в данном регионе, что имеет большое значение для развития геофизических, картографических, кадастровых, инженерно-изыскательских, дорожно-строительных работ.

Апробация работы и публикации

Основные результаты исследований неоднократно докладывались на российских и международных конференциях: «Геофизика-2001», Новосибирск; «Проблемы региональной геофизики» 2001, Новосибирск; «Геодинамика и геозоологические проблемы высокогорных регионов», 2002, Бишкек, Киргизия; «Asian-Pacific Space Geodynamics» Project (APSG-2002, 2005, 2006, 2008) Иркутск, Hong Kong, Jeju, South Korea, Новосибирск; «Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков», 2002, Иркутск; «Современные проблемы геодезии и оптики», 2003, Новосибирск; Сибирская конференция молодых ученых по Наукам о Земле, 2004, 2006, Новосибирск; «Современная геодинамика и сейсмичность Центральной Азии, фундаментальные и прикладные аспекты», 2005, Иркутск; «Активный геофизический мониторинг литосферы Земли», 2005, Новосибирск; ГЕО-СИБИРЬ-2006, 2007, 2008, Новосибирск; XL, XLI Тектоническое совещание 2007, 2008, Москва; «Трофимуковские чтения», 2007, 2008, 2009, Новосибирск; «New Challenges in Earth's Geodynamics» (ETS-2008), Jena, Germany.

Результаты неоднократно обсуждались на заседаниях лаборатории естественных геофизических полей и лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН.

По теме диссертации автором опубликовано 52 работы, в том числе 7 в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из 3 глав, введения и заключения. Общий объём работы составляет 151 страница, в том числе 19 таблиц, 70 рисунков и списка литературы из 130 наименований.

Благодарности. Автор выражает свою искреннюю благодарность за постановку задачи, обсуждение результатов своему научному руководителю д.ф.-м.н. Тимофееву В.Ю., а также академику Гольдину С.В., академику Эпову М.И., д.г.-м.н. Дучкову Д.Г., к.г.-м.н. Дядькову П.Г., д.т.н. Ельцову И.Н. за внимание и поддержку при выполнении работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

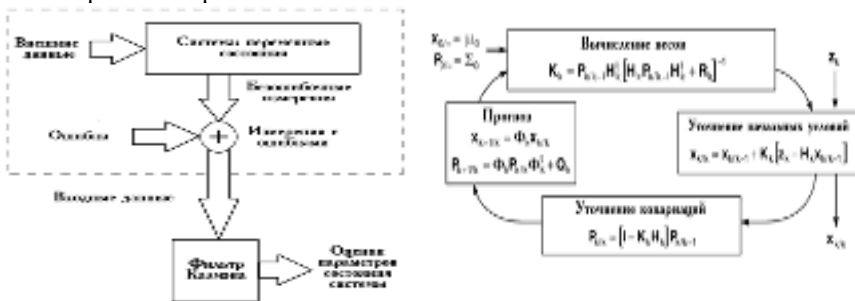
Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель и задачи, излагаются защищаемые положения, а также рассматривается научная и практическая значимость, полученных результатов и их новизна, приводятся сведения об апробации и структуре работы.

В первой главе проводится анализ современных методов определения скоростей смещения земной коры. Рассматриваются принципы построения кинематических моделей смещений для Земли и для отдельных регионов. Появление методов космической геодезии позволило по-новому подходить к решению известных геофизических задач. Метод сверхдлиннобазисная интерферометрия (VLBI) уже в начале 80-х годов прошлого столетия позволил сделать первые определения скоростей смещения тектонических плит Земли и косейсмических смещений в зонах крупных землетрясений. На основе экспериментальных данных была создана геоцентрическая система WGS84. Дальнейшим развитием в более дешёвом и мобильном варианте явился GPS метод. Использование метода в геодинамических исследованиях (точность определения координат $0.1 \div 1.0$ мм) требует наличия как специальных технических возможностей (одновременные измерения на постоянных и сетевых пунктах с помощью двухчастотных геодезических приёмников) так и специальной технологии измерений и обработки данных. Обработка данных проводилась с помощью пакета GAMIT/GLOBK известного как – обширный комплекс программ для анализа GPS измерений, для изучения деформаций земной коры (рис. 1а). GAMIT – это коллекция программ обработки фазовых данных для оценки трехмерных относительных координат наземных станций, орбит спутников, атмосферной зенитной задержки и параметров ориентации Земли. Пакет разработан для работы на любой UNIX-подобной операционной системе (в нашем случае на ОС Linux RedHat 7.2).

Для вычисления значений скоростей применялась следующая методика. Параметры трансформации геодезических систем координат, орбит спутников и ориентации Земли, лунные и солнечные эфемериды, данные о нутации и вращении полюса Земли, океанических приливах, временных задержках UT1, а также характеристики антенн GPS-приемников, точные эфемериды орбит

спутников - взяты из сети IGS, путем скачивания этих данных с серверов хранения и обработки данных сети IGS, таких как SOPAC. Ежесуточные комбинированные решения по всем мировым станциям сети IGS также взяты с серверов SOPAC, MIT. Главная часть – экспериментальные данные измерений методом GPS, полученные нами при проведении полевых экспедиций.

Обсчет массива данных проводится программным модулем GAMIT, используя методику расчета совместных измерений по сети, методом наименьших квадратов. На выходе получаем точные значения координат станций, в системе ITRF2000, для каждого дня эксперимента. Далее, для получения поля скоростей, полученные значения координат станций обрабатываются совместно с комбинированными общемировыми сетевыми решениями, в модуле GLOBK. GLOBK является реализацией фильтра Калмана (рис.1б), основная цель работы которого – комбинирование различных геодезических решений, таких как эксперименты методами GPS, VLBI и SLR. Принимается, что данные, или «квази-наблюдения», оцениваются и из анализа наблюдений создается ковариационная матрица, включающая в себя координаты станции, параметры ориентации Земли, орбитальные параметры, исходную позицию станции. Входные решения обычно выполнены с изначальными неопределенностями во всех глобальных параметрах, так что поправки могут быть использованы для коррекции в комбинированном решении.



а б
 Рис. 1. а) Блок-схема алгоритма расчета пакетом GAMIT/GLOBK. б) Блок-схема алгоритма фильтра Калмана. (GPSWorld, сентябрь 1997)

Наряду с рассмотренным программным пакетом для обработки сигналов используются также пакеты программ BERNESE, GIPSY-OASIS.

Использование GPS метода с начала 90-х годов позволило значительно продвинуться в изучении современных смещений тектонических плит Земли, оценить величину деформирования отдельных сейсмоактивных регионов, например в зоне разлома Сан-Андреас, территории Японии, Китая, Тянь-Шаня, Северо-Анатолийского разлома и т.д. Выделены внутриплитные блоковые вращения, например Тарима, Амурской плиты и других. При этом

получение все более точных значений скоростей смещения пунктов в геоцентрической системе координат приводит к постоянному уточнению систем координат – ITRF1995, ITRF2000, ITRF2005. Построение решение для отдельных геодинамических региональных сетей обычно проводится относительно недеформируемой станции или относительно тектонической плиты. Исключение плитного смещения позволяет выделить аномальные смещения, отражающие деформирование сейсмоактивного региона. Анализ существующих моделей плитного движения Евразии показал наличие отклонения от экспериментальных решений на 2 мм, что потребовало уточнение моделей. Используя данные по постоянным станциям от Урала до Байкала, в том числе и по заложённой и обслуживаемой нами станции NVSK построено решение AR-IR2006 (таблица 1). Как известно, для определения скоростей горизонтальных смещений отдельного пункта с координатами φ и λ используются следующие соотношения:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \omega \cos(\Phi) \sin(\lambda - \Lambda)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \omega [\sin(\Phi) - \cos(\lambda - \Lambda) \tan(\varphi) \cos(\Phi)]$$

где Φ , Λ , ω координаты полюса вращения плиты и её скорость.

В целом анализ современного состояния проблемы современных движений для северной Азии – юга Сибири показывает отсутствие экспериментальных данных по современным смещениям для Алтае-Саянской зоны, а также слабую изученность поле смещений земной поверхности в зонах сильных землетрясений центральной Азии.

Таблица 1. Параметры твердотельного вращения Евразии по различным моделям и экспериментальным данным постоянных станций расположенных в полосе Средний Урал – Прибайкалье (ARTU-NVSK-KSTU-IRKT-2006) модель AR-IR-2006. Ошибка на уровне последней цифры после запятой.

Модель	Параметры полюса вращения		
	φ	λ	Скорость
	Градусы		градус/млн.лет
NNR-Nuvel-1a	50.631°N	247.725°E	0.2337
АРКИМ-2000	57.900°N	262.900°E	0.2587
AR-IR-2006	51.045°N	255.842°E	0.2423

Все выше сказанное позволяет сформулировать следующие задачи исследований:

- определить характер деформирования и смещения блоков земной коры Горного Алтая;
- на основе экспериментальных данных получить модели смещения и деформирования в зоне Чуйского землетрясения.

Во второй главе рассматривается поле смещений земной коры Горного Алтая в эпоху перед Чуйским землетрясением (27.09.2003). Алтай-Саянский регион является одним из наиболее контрастных по формам рельефа в Сибири. Он включает южную окраину стабильной Западно-Сибирской плиты, ряд низкогорных складчатых сооружений и молодую горную систему - Горный Алтай, в пределах которой расположена самая высокая вершина Сибири (г. Белуха, высота 4506 м). Горообразовательные движения в Горном Алтае активно продолжаются в последние 5-10 млн лет. По сейсмологическим данным за последнее столетие, в южной и юго-восточной частях Алтай-Саянской области и их южном обрамлении наблюдались коровые землетрясения с $M = 6 \div 7$. Определение механизмов очагов землетрясений показало, что движение в очагах имеет в основном сдвиговый характер. При построении геодинамической сети выбирались участки, расположенные на различных блоках земной коры, с учетом расположения глубинных разломов. При выборе мест закладки GPS пунктов учитывались наличие открытого горизонта, доступность пункта, состояние дорог, возможность непрерывных измерений на одной точке в течение 2-3 суток, с перекрытием во времени с 2-3 другими работающими станциями сети и базовой станцией. Пункты преимущественно закладывались на выходах коренных пород. Алтайская геодинамическая сеть была заложена в 2000 году в рамках международного проекта ИНТАС № 97-30874. Она объединила сети Тянь-Шаня (Киргизия, Восточный Казахстан) с сетями Саян, Байкальской рифтовой зоны, Монголии и Китая. Сеть, простирающаяся от Новосибирска до монгольской границы, на конец 2003 годов насчитывала 21 пункт, включая одну базовую постоянную станцию. В целом, она охватывает территорию от 49 градуса на юге до 55 градуса на севере и от 81 градуса на западе до 92 градуса на востоке и включает структурные элементы Горного Алтая и его окружения. Первые результаты, полученные по Алтайской сети (2002 г.) в комплексе данными по окружающим территориям центральной Азии показаны на рис. 2.

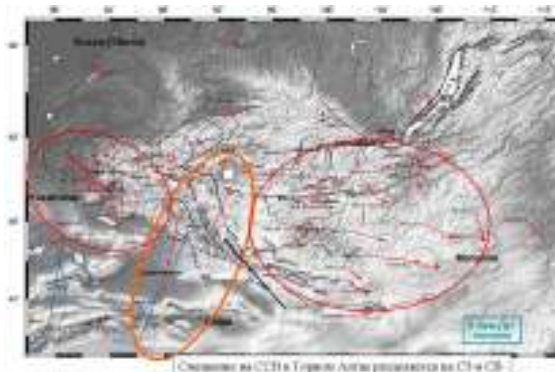


Рис. 2. Скорости горизонтальных смещений центральной Азии относительно Евразии, 2002 г.

В проведение измерений в следующем году позволило после обработки получить поле горизонтальных и вертикальным смещений в эпоху перед Чуйским землетрясением (27.09.2003 г.). Полученное решение показано на рис.3, где выделяются горизонтальные смещения на СЗ подобные движениям Восточного Казахстана, а также смещения на СВ прослеживающиеся от зоны контакта Индийской плиты через западный Китай и Монгольский Алтай.

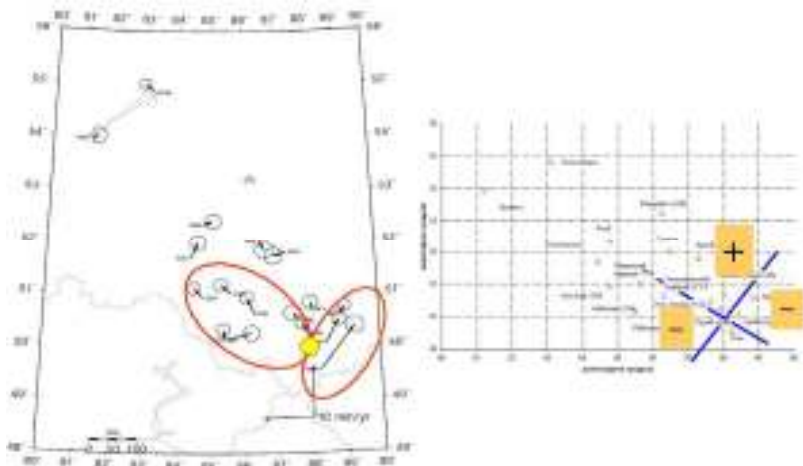


Рис. 3. Горизонтальные и вертикальные смещения перед землетрясением. Эпоха 2000-2003 гг.

В этом поле выделены следующие закономерности – для юго-восточной части Горного Алтая выделены смещения на северо-восток со скоростью 3-11 мм в год. Для центральной и западной частей Горного Алтая векторы скоростей направлены на северо-запад, величины скоростей 1-3 мм в год. Разделение направлений векторов смещений происходит в зоне будущего Чуйского землетрясения. Анализ составляющей смещений на север по профилю Лхаса-Новосибирск показывает падение скорости, начиная с зоны будущего землетрясения. Для вертикальных скоростей смещений (2000-2003 гг.) выделено увеличение скорости к югу до 4 мм в год, к эпицентральной зоне будущего землетрясения. В будущей эпицентральной зоне по профилю Укок - Чаган-Узун - Язула зарегистрировано опускание. Из анализа данных нивелирования эпохи 1938-1978 гг. к югу отмечено опускание со скоростью до 8 мм в год (профиль вдоль Чуйского тракта). В эпоху 1978-2003 гг. по профилю Кызыл - Кош-Агач зарегистрировано поднятие со скоростью до 5 мм в год, что соответствует нашим GPS данным (2000-2003 гг.). Пересчет поля смещений в поле деформаций позволяет выделить anomalous поведение поля в южной части Горного Алтая для сдвиговой компоненты, что соответствует накоплению деформаций на будущем разрыве в эпицентральной зоне.

В третьей главе рассматриваются поля косейсмических смещений и модели процесса. Впервые изучение пространственного распределения смещений по территории с размерами до сотен километров вокруг эпицентра оказалось возможным с развитием методов космической геодезии. После Чуйского землетрясения (USGS, NEIC, 27/09/2003, 49.999°N, 87.856°E, M = 7.3) опрос по пунктам геодинамической сети Горного Алтая проводился в два этапа, весной (рис. 4) и летом 2004 года (таблица 2).

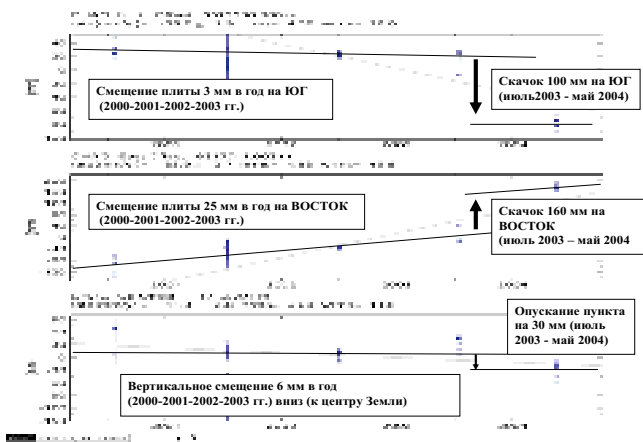


Рис. 4. Смещение пункта Чаган-Узун июль 2000 г. – май 2004 г. относительно центра Земли (сверху вниз: по широте, по долоте, по вертикали). Показано смещение пункта на юго-восток в эпоху Чуйского землетрясения

Максимальные смещения зафиксированы в эпицентральной зоне (рис. 5) на расстоянии 100 км более смещения оказались менее 10 мм. Обнаружена зависимость смещений от расстояния до плоскости сейсмического разрыва. Зарегистрированные смещения уменьшаются от 0.35 м в 15 километрах от линии разрыва до 0.02 м в 90 километрах. Вертикальные смещения достигают максимальных значений (0.01-0.03 м) для трех станций (CHAG, KURA, UKOK) вблизи разрыва и оказываются на порядок меньше горизонтальных.

По результатам для косейсмических смещений в зоне разрыва выделяется правостороннее смещение на разломе. Исходя из предположения, что смещение параллельно положению разрыва, его ориентация по нашим определениям для пунктов CHAG и KURA оказывается $140^{\circ}\text{N} \pm 15^{\circ}$. По эффектам первого порядка, отражающим правосторонний сдвиг, можно предложить для интерпретации смещений модель упругой отдачи на вертикальном разломе. В рамках теории упругой отдачи по модели простой винтовой дислокации на вертикальном разрыве смещения на поверхности описываются соотношением:

$$\text{Смещение} \int_{-\infty}^x \varepsilon dy = (\Delta\omega/2) \cdot [1 - (2/\pi) \cdot \text{arctg}(x/a)]$$

Скачок горизонтальных смещений (2003-2004 гг.)

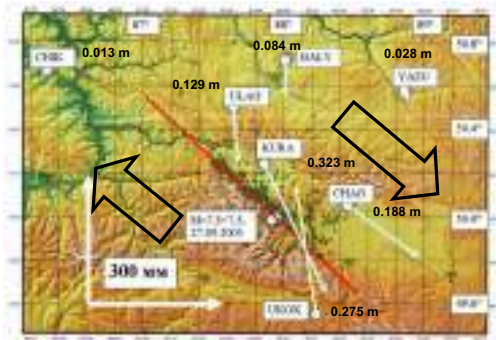


Рис. 5. Векторы горизонтальных смещений в эпицентральной зоне

В рамках модели образования разлома со смещением по простиранию, смещение ω_z удовлетворяет уравнению Лапласа, а сопровождающее землетрясение смещение поверхности в функции расстояния от разлома можно записать как:

$$\Delta\omega_z = \pm\Delta\omega_{z0} \cdot [(1 + x^2/a^2)^{1/2} - |x|/a] / 2.$$

Таблица 2. Косейсмические смещения пунктов Алтайской геодинамической сети, эпоха 2003-2004 гг.. В колонках слева направо: координаты пунктов (долгота и широта в градусах), горизонтальные скорости (на восток и на север) и их ошибки в мм, код пункта сети. Выделены пункты, расположенные в 100 км от эпицентральной зоны землетрясения 27.09.2003 г.

Пункт	Широт.	Горизонтальные скорости (мм/год ± ошибка в мм)		код пункта (ИГГ)
		на восток	на север	
83.235	54.841	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	NVSK
83.291	54.996	3.89 ± 1.73	-7.70 ± 1.63	YAZU
84.417	54.968	154.47 ± 2.13	107.71 ± 1.96	CHAC
88.232	48.262	-33.97 ± 2.69	172.79 ± 2.18	UKOK
86.002	54.916	-3.58 ± 2.87	-6.04 ± 2.30	BALU
87.890	54.245	132.31 ± 2.11	395.17 ± 1.88	KURA
87.654	54.200	15.68 ± 3.11	-128.43 ± 2.58	ULAG
87.969	54.249	0.31 ± 2.77	10.75 ± 2.18	ARFI
86.471	53.213	1.67 ± 2.58	0.34 ± 2.11	TUNG
86.313	54.844	-10.84 ± 2.58	-7.87 ± 1.92	CHIK
86.198	51.361	6.11 ± 3.51	8.10 ± 2.98	ILIS
85.826	51.214	3.68 ± 2.85	2.01 ± 1.76	SEMI
84.759	51.839	-3.95 ± 1.87	-6.37 ± 1.53	USTE
84.788	51.892	8.78 ± 1.96	4.61 ± 1.84	ANSI
84.419	51.700	8.52 ± 2.24	2.49 ± 2.17	SULO
84.238	51.857	-8.63 ± 1.57	6.35 ± 1.73	KRST



Рис. 6. Теоретическое распределение горизонтальных смещений в эпицентральной зоне и экспериментальные данные

Использование этих моделей и экспериментальных данных на различных расстояниях от разрыва (CHAG и YAZU) перебором параметров получены величины относительно смещения бортов разрыва $1.7 \div 1.9$ м и глубины разрыва в центре зоне $9 \div 10$ км. Используя последнее соотношение для станций вблизи эпицентра (KURA и CHAG) получаем следующие значение параметров: смещение на разрыве 1,8 м; глубина 16,5 км. Соотношение теоретическое распределение горизонтальных смещений в эпицентральной зоне и экспериментальных данных показано на рис. 6.

В этом случае величину сброса напряжений можно получить из соотношения:

$$\sigma_{xz,0} = \Delta\omega_{z0} \cdot G / a$$

При значениях модуля упругости среды G от 30 ГПа до 55 ГПа, глубине от 9 км до 16 км и относительном смещении 2 м получаем оценки напряжения от 2 до 6 МПа. Среднее значение – 4 МПа. Используя полученную величину относительного смещения 2 м, в разных частях разрыва проводилось определение его глубины (рис. 7), а далее проведено определение протяженности разрыва: 140 км. По экспериментальным GPS результатам получена модель разрыва, которую можно представить в виде трех плоскостей. При величине относительного смещения $\Delta\omega = 2$ м и при модуле упругости земной коры $\mu = 3.3 \cdot 10^{10}$ Па, получаем величину сейсмического момента $M_0 = \mu \cdot \Delta\omega \cdot S = 0.9 \cdot 10^{20}$ Н·м. Таким образом, для магнитуды землетрясения получаем оценку $M_w = (\lg M_0 / 1.5) - 6.03 = 7.2$.

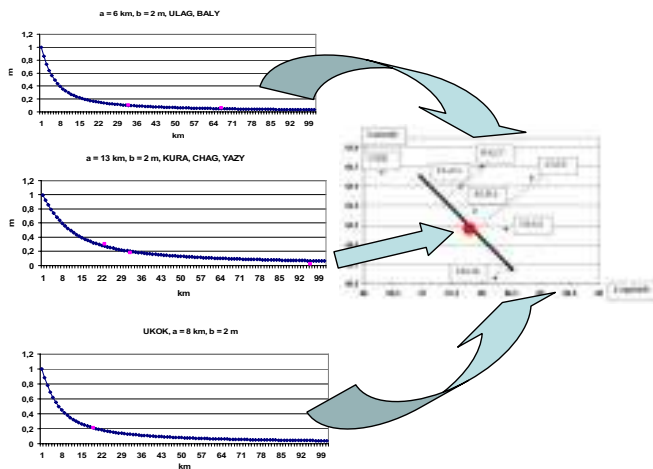


Рис. 7. Распределение горизонтальных смещений при относительном смещении 2 м при глубинах 6 км, 13 км и 8 км

Значение косейсмической деформации представлено на рис. 8.

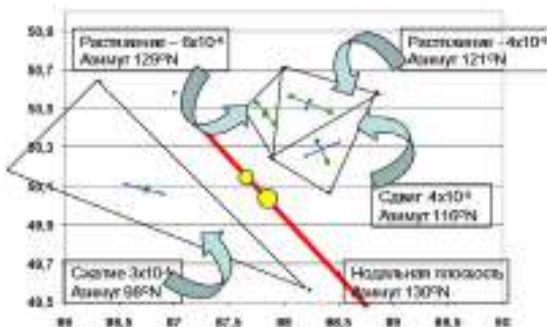


Рис. 8. Косейсмическая деформация, вычисленная по экспериментальным данным, (2003-2004 гг.)

2D подход рассмотрен на примере данных радарной съёмки [Xinjian Shan, Jiahang Liu, Chao Ma, 2004] при Кунь-Луньском землетрясении (25.11.2001, $M = 8.2$), при этом полученные значения глубины разрыва соответствуют сейсмологическим данным. Поверхностные смещения, обусловленные различными видами подвижек на разломах, в полупространстве рассматриваются также в рамках 3D модели. Следует отметить что, несмотря на значительный прогресс в теоретических вычислениях полей, анализ реальных данных обычно базируется на достаточно простых допущениях – изотропного и однородного

полупространства и для простейших видов источников, последующим причинам. Первое – это наиболее подходящая и полезная модель для первого шага аппроксимации, второе – модель источника соответствует этой простой ситуации, а третье – качество данных для всех компонент современных смещений все еще остается низким. По этим причинам чрезвычайное усложнение моделей не имеет смысла. В рамках модели точечного источника, предложенной Стиккетти (1958), оказывается, что поле смещений $u_i(x_1, x_2, x_3)$ вызванное дислокацией $\Delta u_j(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ на поверхности изотропной среды описывается выражением:

$$u_i = (1/F) \int_{\Sigma} \Delta u_j \{ \lambda \delta_{ij} (\partial u_i^n / \partial \xi_n) + \mu [(\partial u_i^j / \partial \xi_k) + (\partial u_i^k / \partial \xi_j)] \} v_k d\Sigma$$

Где δ_{kj} символ Кронеккера, λ и μ константы Ламе, v_k направление косинуса нормали к элементу поверхности $d\Sigma$, u_i^j – i -я компонента смещения в точке (x_1, x_2, x_3) , обусловленная силой F в точке (ξ_1, ξ_2, ξ_3) в j -ом направлении для однородного полупространства. Для модели ограниченного прямоугольного источника длиной L и шириной W решение получается двойным интегрированием из уравнений для точечного источника. 3D модель реализована в программном пакете Coulomb 3.1., решения, полученные с его для горизонтальных и вертикальных смещений, приведены на рис. 9 а, б.

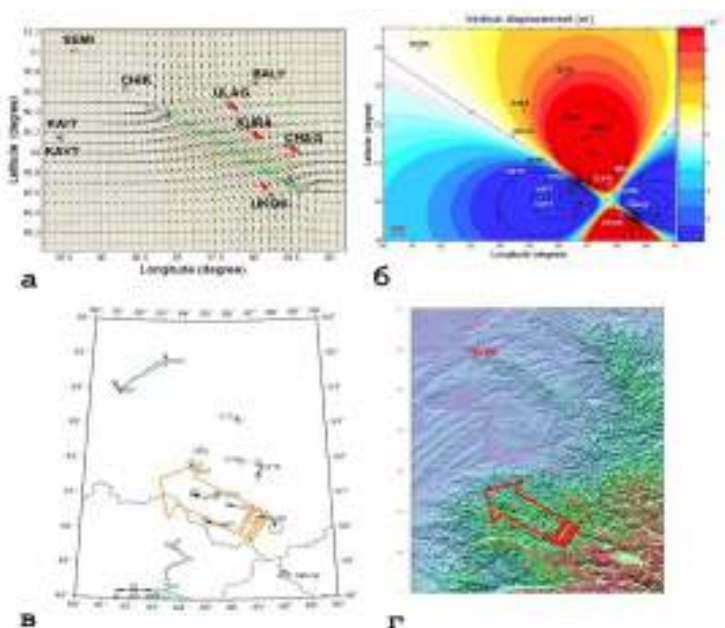


Рис. 9. а) горизонтальные и б) вертикальные смещения, вычисленные с помощью программы Coulomb 3.1 и экспериментальные данные по GPS измерениям. в) современные движения Горного Алтая, 2 мм/год, г) рельеф региона

Здесь же показаны экспериментальные данные по точкам. Как видим из приведенных решений, в целом получено хорошее соответствие данных моделирования при параметрах смещений на разрыве: относительное смещение 2 метра, длина разрыва 140 км, ориентация и расположение разрыва 130°N , положение эпицентра 49.999°N , 87.856°E , глубина разрыва 10 километров.

Полученные по району Чуйского землетрясения данные по радарной съёмке в эпохи перед и после землетрясения рассматривались в работах [Nissen et al., 2007; Barbot et al., 2008; Михайлов и др., 2008]. В целом, данные, приведенные в этих работах, в пределах особенностей метода радарной съёмки соответствуют нашим результатам. Исключая из результатов решения 2000-2006 гг., зону Чуйского землетрясения получено представление о современных тектонических движениях Горного Алтая. Вектор смещения направлен на северо-восток, а его величина 2 мм в год неплохо соответствует данным моделирования смещений Азии (рис. 9в).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом исследований является поле скоростей современных вертикальных и горизонтальных движений для территории Горного Алтая. Создание в этом районе сети GPS станций позволило соединить соответствующие сети Средней Азии, Тувы и Байкальской рифтовой зоны. Анализ результатов наблюдений по этим сетям, с привлечением данных по Монголии и Китаю позволяет сделать вывод о затухании смещений при приближении к платформам Сибири. Важным итогом работы является получение поля скоростей перед сильнейшим Чуйским землетрясением на юге Горного Алтая. В поле горизонтальных скоростей Горного Алтая проявляется как компонента СВ смещения, проявляющаяся на пунктах Тибета (Лхаса), западного Китая (Урумчи) и северо-западной Монголии, так и компонента СЗ смещения, отмеченная также на прилегающей территории Восточного Казахстана. Величины смещений для территории Горного Алтая составляют от 0.2 до 3 мм в год, и только на юге скорости возрастают до 5-10 мм год (эпоха 2000-2003 гг.). Поле смещений Горного Алтая является результатом сжатия ($3 \cdot 10^{-8}$ /год) по направлению север-юг. В зоне будущего землетрясения появляется сдвиговая компонента ($7 \cdot 10^{-8}$ /год). Для косейсмических смещений (2003-2004 гг.) характерен правосторонний сдвиг в эпицентральной части. Особенности поля скоростей до и после события приводят к выбору модели упругой отдачи. Полученные результаты лежат в рамках дислокационной теории землетрясений. Экспериментальные результаты и их интерпретация в рамках статической задачи позволили определить параметры сейсмического разрыва: ориентация плоскости разрыва $140^{\circ}\text{N} \pm 15^{\circ}$, относительное смещение (2 метра), распределение глубины (от 5 до 15 км), снятого сдвигового напряжения (4

МПа), величины сейсмического момента $M_0 = 0.9 \cdot 10^{20}$ Н·м и магнитуды землетрясения $M_w = 7.2$. Как показали представленные результаты при землетрясениях магнитудой $M > 7$ измеримые смещения земной коры охватывают территорию с размерами в несколько сотен километров. Деформации земной коры, снятые при землетрясении в зоне до 100 км достигают единиц на 10^{-6} . При исключении эпицентральной области получена оценка скорости современных тектонических движений Горного Алтая (2 мм в год, на СЗ). Она оказалась в пределах современных модельных представлений для южной и центральной Азии. В работе показаны возможности методов космической геодезии при изучении параметров очага сильного землетрясения, что является важным при изучении землетрясений случившихся в труднодоступных высокогорных районах. Полученные результаты также важны для развития теории землетрясений и поиска методов их прогноза. Развитие высокоточных геодинамических сетей имеет важное практическое значение для развития геофизических, картографических, кадастровых, инженерно-изыскательских, дорожно-строительных работ в регионах Сибири.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тимофеев В.Ю., **Ардуков Д.Г.**, Дучков А.Д., Запеева Е.А., Кале Э. Космогеодезические исследования современной геодинамики западной части Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – №11. – С. 1208-1215.
2. С.В. Гольдин, В.Ю.Тимофеев, **Д.Г. Ардуков**. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай. // ДАН. – 2005. – Т. 405. – № 6. – С. 804-809.
3. Тимофеев В.Ю., **Ардуков Д.Г.**, Кале Э., Дучков А.Д., Запеева Е.А., Казанцев С.А., Русбек Ф., Брюникс К. Поля и модели смещений земной поверхности Горного Алтая. // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47. – № 8. – С. 923-937.
4. **Д.Г. Ардуков**, Е.В.Бойко, Р.Г. Седусов, В.Ю. Тимофеев. Движения земной коры в зонах строительства транспортных магистралей. // Труды научной конференции «Трофимовские чтения -2007». – Новосибирск. – ИНГГ СО РАН. – С. 221-222.
5. Тимофеев В.Ю., Дюкарм Б., Ван Раумбеке М., Горнов П.Ю., Эвераерт М., Грибанова Е.И., Паровышний В.А., Семибаламут В.М., Вепельман Г., **Ардуков Д.Г.**. Трансконтинентальный приливный профиль: Атлантическое побережье Европы - Юг Сибири - Тихоокеанское побережье России // Физика Земли. – 2008. – № 5. – С. 42-54.
6. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ван Раумбеке М., **Ардуков Д.Г.**, Лаврентьев М.Е., Седусов Р.Г. Приливная модуляция слабой сейсмичности для южной части Сибири. // Физическая мезомеханика. – Т. 11. – № 4. – 2008. – С.81-93.
7. Тимофеев В.Ю., **Ардуков Д.Г.**, Горнов П.Ю., Малышев Ю.Ф., Бойко Е.В. Результаты анализа данных GPS измерений (2003-2006 гг.) на Дальнем Востоке по Сихотэ-Алинской сети. // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27. – № 4. – С. 39-49.
8. Тимофеев В.Ю., **Ардуков Д.Г.**, Бойко Е.В. Современные движения Горного Алтая // Физическая мезомеханика. – Т. 12. – №1. – 2009. – С. 45-54.

Технический редактор О.М.Вараксина

Подписано в печать 17.07.2009

Формат 60x84/16. Бумага офсет №1. Гарнитура Таймс

Печ. л. 0,9. Тираж 130. Зак. № 25

ИНГГ СО РАН, ОИТ, пр-т Ак. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090