

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.24

ПОЛЯ И МОДЕЛИ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ

В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, Э. Кале*, А.Д. Дучков, Е.А. Запreeва,
С.А. Казанцев, Ф. Русбек**, К. Брюникс**

Институт нефтяной геологии и геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

** Purdue University, West Lafayette, USA*

*** Royal observatory of Belgium, Brussels*

По результатам экспериментальных определений 3D смещений земной поверхности Горного Алтая с 2000 по 2004 г. предложена модель упругой отдачи для Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. ($M = 7,3—7,5$). В работе представлены результаты обработки данных ежегодных опросов Алтайской GPS-сети (2000, 2001, 2002, 2003, 2004 гг.). Геодинамическая сеть ИГФ СО РАН, состоящая из 21 пункта, охватывает структурные элементы Горного Алтая с выходом на южную часть Западно-Сибирской плиты и в Западные Саяны. Сеть включает базовую станцию Ключи ИГФ СО РАН (код в системе мировых станций IGS — NVSK DOMES N12319 M001). Рассматриваются смещение станции NVSK в системе постоянных станций Азии и особенности полей смещений центрально-азиатских станций. В результате обработки сетевых наблюдений (2000—2003 гг.) получена карта скоростей современных движений земной поверхности Горного Алтая. Значения скоростей лежат в интервале от 0,2 до 11 мм/год. Перед Чуйским землетрясением на юге Горного Алтая в поле скоростей выявлены особенности, отражающие процесс подготовки землетрясения. По результатам измерений за период 2003—2004 г. получена картина постсейсмических смещений, отражающая правосторонний сдвиг в эпицентральной зоне. Смещения убывают с расстоянием от нодальной плоскости разрыва от 300 мм (15 км) до 25 мм (90 км). Для описания явления рассматриваются модели упругой отдачи для 2D смещений на земной поверхности. Используя экспериментальные данные в рамках выбранной модели, получены оценки снятых напряжений и смещений по линии разрыва. Приводятся модельные оценки сдвиговых деформаций и экспериментальные определения.

Поля смещений земной поверхности Горного Алтая, Чуйское землетрясение 27.09.2003, технология GPS, модель упругой отдачи.

DISPLACEMENT FIELDS AND MODELS OF CURRENT MOTION IN GORNY ALTAI

V.Yu. Timofeev, D.G. Ardyukov, E. Calais, A.D. Duchkov,
E.A. Zapreeva, S.A. Kazantsev, F. Roosbeek, and C. Bruyninx

We suggest a model of elastic rebound for the $M = 7.3–7.5$ Chuya earthquake of 27 September 2003 based on 3D ground motion data from Gorny Altai. We report processing results of yearly sampling through 2000–2004 at the Altai GPS stations. The geodynamic network of the Institute of Geophysics (Novosibirsk) consists of 21 stations, including the reference station Klyuchi (word network code IGS-NVSK DOMES N12319 M001); it covers the structural elements of Gorny Altai and extends into the southern West Siberian Plate and the Western Sayan mountains. Estimates of displacement at the NVSK station in the system of permanent stations of Asia and displacement fields of Central Asian stations were processed to obtain a velocity map of recent crustal movements in Gorny Altai. The velocities are in the range of 0.2 to 11 mm/yr. The velocity field shows signature of a preseismic process before the Chuya event in southern Gorny Altai. Measurements through 2003–2004 give a pattern of postseismic motion indicating a right-lateral strike slip in the epicentral area. The amount of displacement decreases away from the nodal plane from 300 mm at 15 km to 25 mm at 90 km far from the main shock. The phenomenon is explained in terms of elastic rebound in a 2D dislocation model. As a result of modeling with the use of experimental data, we obtained a 4 MPa stress release and a 2 m displacement along the fault at the epicenter, at an average fault depth of 8 km. The shear strain related to the earthquake was estimated to be 10^{-6} within 100 km away from the rupture.

Current motion field, GPS technology, elastic rebound model, Chuya earthquake of 27.09.2003, Gorny Altai

ВВЕДЕНИЕ

Исследования современных движений земной коры Горного Алтая, начиная с 2000 г., проводятся с использованием технологий космической геодезии [1, 2]. Целью работы являлось получение поля скоростей современных движений земной коры. После произошедшего крупного Чуйского землетрясения (27.09.2003 г., 49,999° с.ш., 87,856° в.д., $M = 7,3—7,5$) [3—5] можно указать и другие задачи: 1) количественное определение тектонических эффектов в современном поле скоростей движений; 2) выделение эффектов, предшествующих землетрясению; 3) получение картины смещений после землетрясения; 4) выбор моделей смещений для Чуйского землетрясения; определение параметров модели и закономерностей распределения смещений с учетом расстояния от разрыва и глубины разрыва; оценка снятых напряжений.

Современная картина смещений для территории Горного Алтая определяется несколькими эффектами — тектоническими, связанными в основном с влиянием коллизии Индийской плиты в Евразийскую плиту, и быстрыми сейсмическими, связанными с сильными землетрясениями региона. Обычно моделирование поля тектонических смещений в Южной и Центральной Азии под действием перемещений Индийской плиты рассматривается с учетом скоростей смещений по главным разломам континента в голоцене [6—11]. В рамках такой модели скорости смещения на северной границе влияния Индо-Евразийской коллизии, проходящей по югу Сибири, достигают 1 мм/год [9]. Количественно модельные значения сравнимы с оценками, полученными методами GPS-геодезии в Центральной Монголии и Байкальской рифтовой зоне (0,5—5 мм/год). В результатах GPS-измерений также отражаются процессы постсейсмических течений и раздвижение рифтовой впадины оз. Байкал [12, 13]. Следует отметить, что малые значения скоростей движений создают естественные трудности в изучении современных процессов в земной коре Горного Алтая. Сочетание эффектов подготовки сильного землетрясения и тектонических вековых движений, как будет показано ниже, еще более осложняет картину. Количественное определение значений постсейсмических смещений, а также их распределение в пространстве и во времени являются важной задачей геодезии и геофизики, и позволяют разрабатывать модели явления, отражающие распределение напряжений, смещений и деформаций земной коры в зоне влияния землетрясения. Величины постсейсмических смещений при сильных землетрясениях, по различным данным, достигают нескольких метров [13, 14]. В последние десятилетия данные о таких смещениях получены современными методами космической геодезии в различных районах мира — на Аляске, в Японии, на Камчатке, Сахалине, в Андах и на Суматре [15, 16]. Выбор модели смещения остается важной и сложной задачей геофизики. Оценка постсейсмических смещений, по данным GPS-измерений, в некоторых случаях позволяет решать обратную задачу для распределения смещений и напряжений в земной коре [17].

СОВРЕМЕННОЕ ПОЛЕ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Сети постоянных и временных станций на территории Центральной и Южной Азии для измерений смещений с использованием различных модификаций методов космической геодезии развиваются с начала девяностых годов прошлого века. В настоящее время сети станций охватывают территорию Киргизии, Казахстана, Российской Федерации, Монголии, Китая и Индии. Для определения положения на основной части станций используется GPS-технология, а также методы VLBI, DORIS и SLR [18]. Исследования обычно проводятся в рамках международных и национальных научных проектов. Так, Алтайская геодинамическая сеть была заложена в 2000 г. в рамках международного проекта ИНТАС № 97-30874. Она объединила сети Тянь-Шаня (Киргизия, Восточный Казахстан) с сетями Саян, Байкальской рифтовой зоны, Монголии и Китая. Алтайская геодинамическая сеть, простирающаяся от Новосибирска до границы с Монголией, на конец 2003 г. насчитывала 21 пункт, включая одну базовую постоянную станцию [19]. В целом она охватывает территорию от 49° на юге до 55° на севере и от 81° на западе до 92° на востоке и включает структурные элементы Горного Алтая и его окружения. Точность полученных результатов при использовании геодезических двухчастотных приемников Trimble-4700 при одновременном многосуточном сетевом опросе и последующей обработке может достигать десятых долей миллиметра. Перечень пунктов сети с координатами на конец 2003 г. представлен в табл. 1. Высоты пунктов измерений составляют от десятков метров на севере в равнинной части до 2,5 тыс. м на юге исследуемой территории.

Обработка результатов измерений по сети проводится с использованием специальных программ относительно постоянных станций Евразии. Высокая точность достигается после учета различных поправок (приливных, за движение полюса и спутниковых) в процессе постобработки данных [20]. Далее получаем скорости смещения станций, которые включают скорости смещения плиты в целом (т. е. вращение на сфере) и аномалии скоростей, связанные со смещениями и деформированием земной коры в тектонически-активных регионах. Аномальные скорости получаем вычитанием эффекта движения плиты, при этом используется либо модель вращения плиты, либо решение по близкой постоянной станции. В последнем случае полагаем, что пункт отражает движение Евразийской плиты в этом регионе и

Таблица 1. Алтайская геодинимическая сеть GPS-измерений (Институт геофизики СО РАН)

№ п/п	Название пункта и код	Координаты		Высота, м	Год закладки пункта
		с.ш.	в.д.		
1	Ключи (NVSK)	54°50'26,18"	83°14'07,62"	123,7	2000
2	Ельцовка (ELTS)	53°15'41,11"	86°14'19,01"	190,7	2000
3	Артыбаш новый (ARTB')	51°47'54,88"	87°16'54,98"	460,7	2001
4	Бальктуюль (BALY)	50°42'10,65"	88°00'06,22"	1259,5	2000
5	Чикетаманский перевал (CHIK)	50°38'38,58"	86°18'45,73"	1249,5	2000
6	Кайтанак скала (KAYT)	50°10'46,46"	85°26'21,64"	1037,5	2000
7	Кайтанак база (KAIT)	50°08'42,42"	85°27'53,25"	979,0	2000
8	Курай (KURA)	50°14'40,16"	87°53'24,61"	1490,3	2000
9	Чаган-Узун (CHAG)	50°04'04,06"	88°25'00,18"	1710,6	2000
10	Семинский перевал (SEMI)	51°00'50,93"	85°37'35,48"	1483,4	2000
11	Туньжа новый (TUNZ)	52°00'46,51"	86°28'14,51"	266,9	2001
12	Усть-Улаган (ULAG)	50°30'01,01"	87°39'13,58"	2039,3	2000
13	Усть-Кан (USTK)	50°56'22,20"	84°46'08,00"	999,4	2000
14	Укок (UKOK)	49°33'43,37"	88°13'54,92"	2323,9	2001
15	Ануй (ANUI)	52°21'24,42"	84°46'06,52"	183,0	2001
16	Крутиха (KRUT)	53°57'25,17"	81°12'30,62"	87,9	2001
17	Солонешное (SOLO)	51°42'00,95"	84°25'08,21"	445,1	2001
18	Язула (YAZU)	50°35'08,80"	88°51'02,51"	1542,8	2000
19	Черемушки (CHER)	52°51'22,62"	91°25'00,10"	381,0	2003
20	р. Мишиха (MISH)	52°26'36,02"	90°02'01,28"	652,3	2003
21	р. Она (RONA)	52°09'33,34"	89°51'45,71"	520,4	2003

Таблица 2. Модели смещения Евразийской плиты и экспериментальные данные для станции NVSK

Модель	Скорость V_N (+ на север), м/год	Скорость V_E (+ на восток), м/год	Вертикальная скорость, м/год	Абсолютная величина вектора смещения, м/год
1. Геодезическая АРКИМ	-0,0001	0,0265	0	0,0265
2. NNR-NUVEL-1	-0,0046	0,0252	0	0,0256
3. NNR-NUVEL-1A	-0,0044	0,0246	0	0,0250
4. Экспериментальные значения (2000— 2004 г.) по результатам счета в IGS CB NASA	-0,0024 ± 0,0001	0,0249 ± 0,0002	+0,0006 ± 0,0004	0,0250 ± 0,0002
Разность по сравнению с моделями				
1—4	+0,0023	+0,0016	—	+0,0015
2—4	-0,0022	+0,0003	—	+0,0006
3—4	-0,0020	-0,0003	—	-0,0000

минимально деформируется. Проиллюстрируем последние положения на примере вычисления скорости движения постоянной станции NVSK в период с сентября 2000 г. по октябрь 2001 г. Положение постоянных станций Азии, относительно которых проводились определения, показано на рис. 1, А. При анализе в различных научных центрах используются специальные программные пакеты, наиболее распространенные GAMIT-GLOBK и BERNESE. Станции включены в систему IGS (International GPS Service), а положение станции NVSK рассматривается в системе ITRF2000.

Первый анализ проводился по программе BERNESE 4.2 для периода июль 2000 г.—октябрь 2002 г. [21]. Рассмотрение реальных материалов по постоянным станциям сети (см. рис. 1) на данный период показало их плохое качество по отдельным станциям в отдельные периоды (KSTU, KUNM, TSKB, NRIL, TIXI), и они были исключены из анализа. Стратегия анализа аналогична используемой при обработке европейских станций системы EUREF. На первом шаге суточные свободные сетевые решения обрабатывались с использованием L3 свободных от влияния ионосферы двойных разностей для фазовых смещений. В среднем 70 % неоднозначностей фиксировалось квазиionoсферным методом (QIFM). Информация об орбитах и параметрах вращения получена по данным системы IGS. Результаты анализа суточных данных

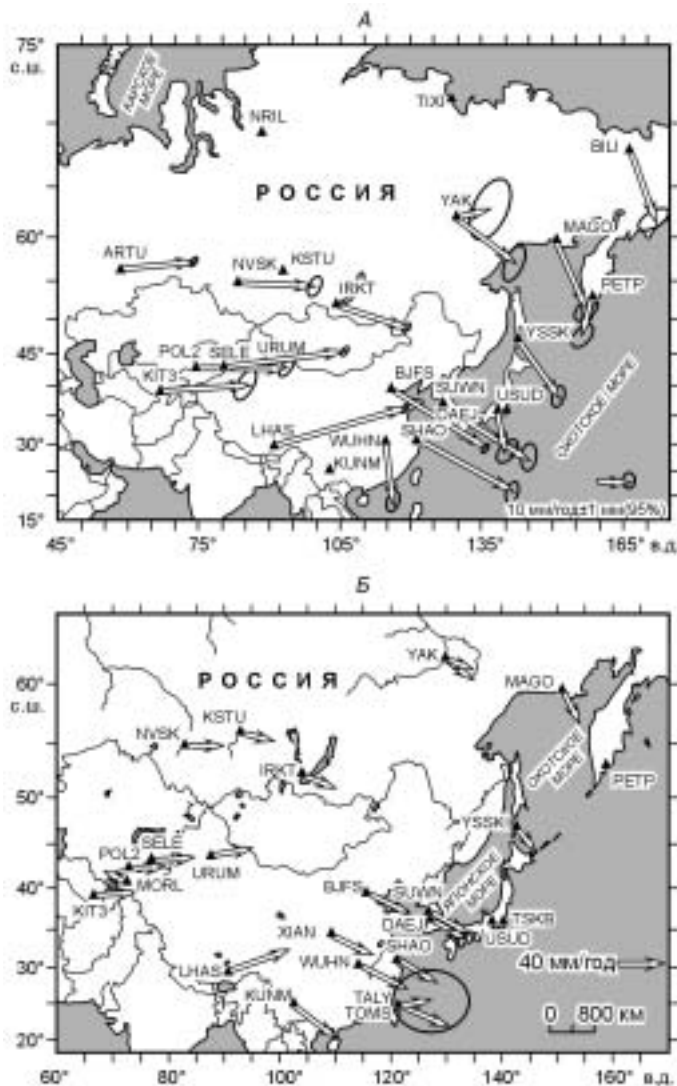


Рис. 1. А — скорости смещения для постоянных станций Азии в геоцентрической системе вместе с ошибками (эллипсы) с сентября 2000 г. по октябрь 2001 г; Б — решение для постоянных станций Азии, полученное в центре SOPAC.

сохранялись в SINEX файлах. На втором шаге SINEX файлы комбинировались при помощи утилиты ADDNEQ из программы BERNESE в общее решение, в котором вычислялись координаты и скорости. Геодезические данные для этого решения определялись из сети в системе ITRF2000 для станций ARTU, BJFS, IRKT, URUM и LHAS. Соответствие между оцениваемой сетью и ITRF2000 составляет 1 см. Координаты станции NVSK в геоцентрической системе на 01.08.2001 составили при ошибке в компонентах 3 и 4 мм (северная и восточная соответственно) и 12 мм для вертикальной: $X = 433605,775$ м; $Y = 365558,526$ м; $Z = 5191286,713$ м, и скорости $V_x = -27$ мм/год, $V_y = 4$ мм/год, $V_z = -1$ мм/год или на земной поверхности $V_N = -1$ мм/год, $V_E = 27$ мм/год, $V_U = 0$ мм/год.

На рис. 1, А показано полученное решение для станций Азии вместе с ошибками. Это решение можно сравнить с результатом анализа аналитического центра SOPAC (см. рис. 1, Б) [22]. Здесь использован другой временной интервал (в смысле отбора данных). Решение для станции NVSK, полученное в центре IGS для большего временного интер-

вала и количества станций (с середины 2000 г. по середину 2004 г.), приведено в табл. 2 [23]. Как видим, с увеличением временного интервала и количества станций, используемых в анализе, существенно (на порядок) увеличивается точность определения параметров.

Соответствие полученной скорости плитного движения станции NVSK существующим моделям проверялось отдельно. Использовались геолого-геофизические модели плитного вращения NNR-NUVEL-1, NNR-NUVEL-1A и модель движения плиты APKIM, полученная по результатам постоянных станций Евразии [24—28]. Сравнение модельных и экспериментальных данных для станции NVSK представлено в табл. 3, отклонения достигают 2 мм.

Таким образом, может быть выбрана различная стратегия снятия плитного движения для получения остаточных (аномальных) значений скоростей современных внутриплитных движений, а именно: исполь-

Таблица 3. Решение для механизма очагов землетрясений [3, 5]

Оси главных напряжений (в градусах)						Нодальные плоскости					
T		N		P		NP1			NP2		
PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP
27.09.2003, $M = 7,3$ ($50,064^\circ$ N, $87,731^\circ$ E)											
10	262	69	143	18	356	38	70	-5	130	85	-160
01.10.2003, $M = 6,7$ ($50,194^\circ$ N, $87,667^\circ$ E)											
1	263	78	168	12	353	37	81	-8	128	82	-170

Примечание. PL — угол между горизонтальной плоскостью и напряжением, AZM — азимут оси напряжения, STK — азимут нодальной плоскости, DP — угол между нодальной плоскостью и горизонтальной, SLIP — угол падения нодальной плоскости.

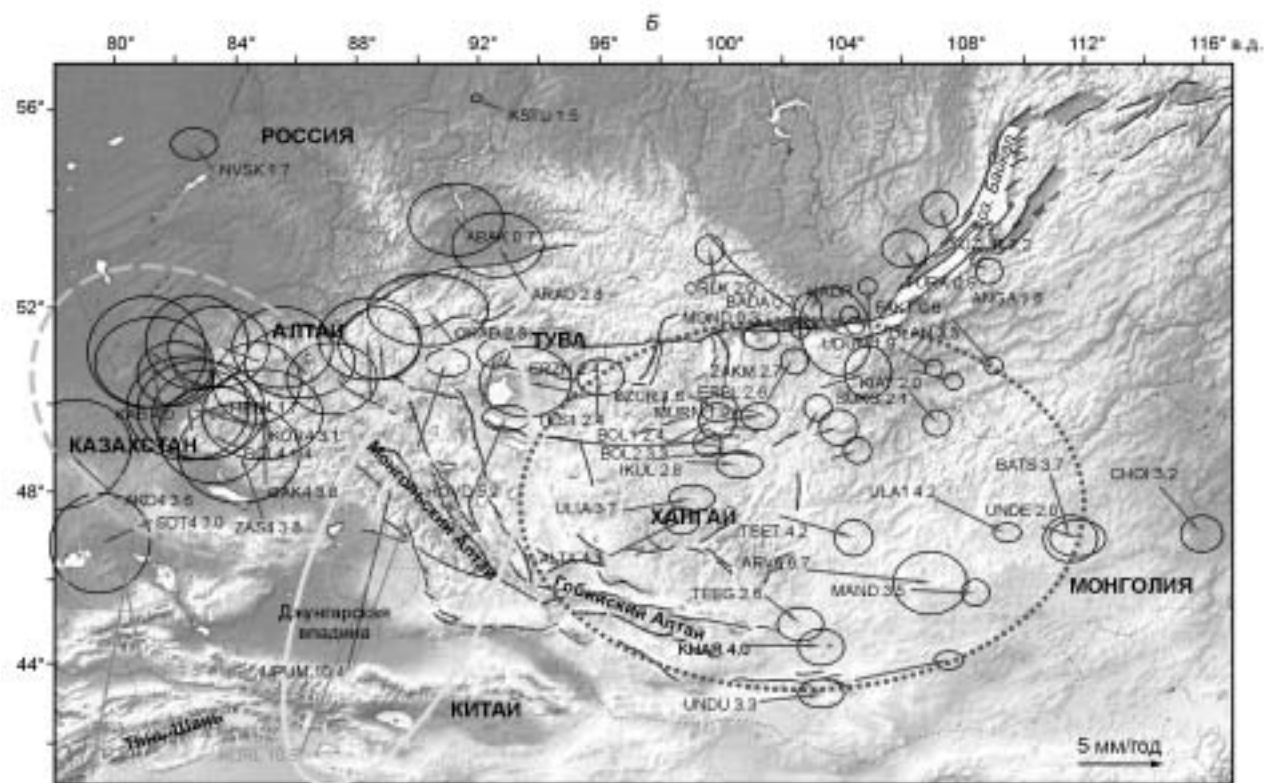


Рис. 2. Остаточные векторы смещений: А — для Азии и окружающих плит, Б — для центра Азии.

Выделены области с преобладающим смещением на восток (красная линия), СЗ (зеленая) и СВ (желтая). 1 — постоянные GPS станции; 2, 3 — границы тектонических плит и государств соответственно. Стрелки с эллипсами ошибок: красные — наше решение, синие — решение по [30].

зование существующих моделей плитного движения или определение аномалий смещений относительно станции, расположенной в стабильной области, или создание новой модели.

Рассмотрим значения остаточных векторов смещений для станций Азии. Анализ остаточных векторов проводился по сетям Восточного Казахстана, Алтая, Тувы, Байкальской рифтовой зоны и Монголии с включением постоянных станций Азии (Китай и Индия). Вычисления проводились по данным, полученным до 2003 г., относительно постоянных станций севера Евразии, они выделены квадратиками на рис. 2, А. Здесь же представлены полученные значения векторов. Различные варианты анализа даны разным цветом [29, 30]. Из полученных результатов наиболее сильно проявляется влияние движения на ССВ Индийской плиты. К северу эта ориентация смещений сохраняется, при этом уменьшается скорость смещения, и, наконец, в районе Горного Алтая появляются компоненты смещения на СЗ и на В. Детальнее ситуация в центре Азии представлена на рис. 2, Б. На широте Горного Алтая основные движения распадаются на составляющие СВ и СЗ. Восточнее проявляется смещение земной коры на восток вплоть до впадины оз. Байкал, где появляется компонента смещения на ЮВ. Итак, общий анализ ситуации, полученный на конец 2002 г., показывает на юге Горного Алтая наличие двух различных компонент смещения. Рассмотрим далее подробнее ситуацию по данным Алтайской сети перед Чуйским землетрясением 2000—2003 гг. и постсейсмические смещения для периода 2003—2004 гг.

СМЕЩЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ГОРНОГО АЛТАЯ ДО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Результаты по четырем циклам измерений на Алтайской сети (2000—2003 гг.) обрабатывались с использованием данных по мировой сети постоянных станций Евразии (NVSK, BJFS, WUHN, IRKT, KUNM, KSTU, LHAS, NRIL, URUM, HYDE, PISC, BAN2, SELE, POL2, KIT3, ARTU, BANR, ZWEN, MOBN, ELAT, ANKR, GLSV) с помощью программ GAMIT-GLOBK [31]. Рассматривались решения как в геоцентрической системе, так и относительно станций Алтайской сети (NVSK, ELTS, KRUT), расположенных к северу от Горного Алтая на равнинной части исследуемой территории. Ошибка при определении значений горизонтальных скоростей составляет 0,6—1,2 мм, для вертикальных скоростей 2,5 мм (четырёхлетний цикл — три эпохи) и 4 мм (трехлетний цикл — две эпохи). Большинство полученных значений горизонтальных скоростей лежат в диапазоне от 0,2 до 4 мм/год. Только для станций на крайнем юге значения горизонтальных скоростей достигли 5—11 мм (рис. 3). Вертикальные скорости в основном не превышали ошибки измерений [32]. Рассматривая поле скоростей, следует отметить, что последний цикл измерений закончен в августе 2003 г., а в конце сентября на юге исследуемого региона произошло катастрофическое землетрясение (27.09.2003, 49,999° с.ш. и 87,856° в.д., $M = 7,3$), параметры которого сведены в табл. 3 [3, 5]. Положение эпицентра землетрясения по различным определениям расходятся на 20 км, решения, полученные системой USGS и АСОМСЭ ГС СО РАН, различаются на 6 км. В дальнейшем

мы используем результаты, полученные центром USGS. Здесь оба решения (предварительное и окончательное) лежат на линии нодальной плоскости (130° с.ш.). В результатах GPS-измерений, полученных за четыре года предшествующих сильному землетрясению, естественно ожидать отражение процессов подготовки землетрясения на фоне поля тектонических скоростей, характерного для северной границы зоны активных деформаций Центральной Азии [32]. Решение для механизма очага землетрясения показывает наличие сжатия в азимуте север—юг и растяжение по широте. Для горизонтальных скоростей следует ожидать сложную картину вследствие сочетания процесса подготовки землетрясения, тектонических эффектов, а также особенностей строения региона, наличия глубинных разломов и их распределение как по долготе, так и по широте.

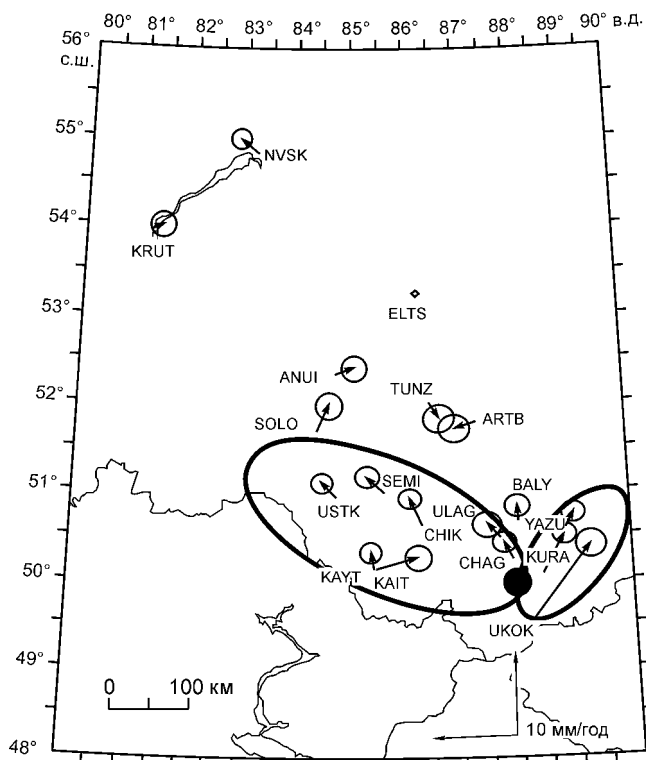


Рис. 3. Поле скоростей горизонтальных движений Горного Алтая и окрестностей относительно п. Ельцовка (ELTS). Черным кружком показано положение эпицентра Чуйского землетрясения.

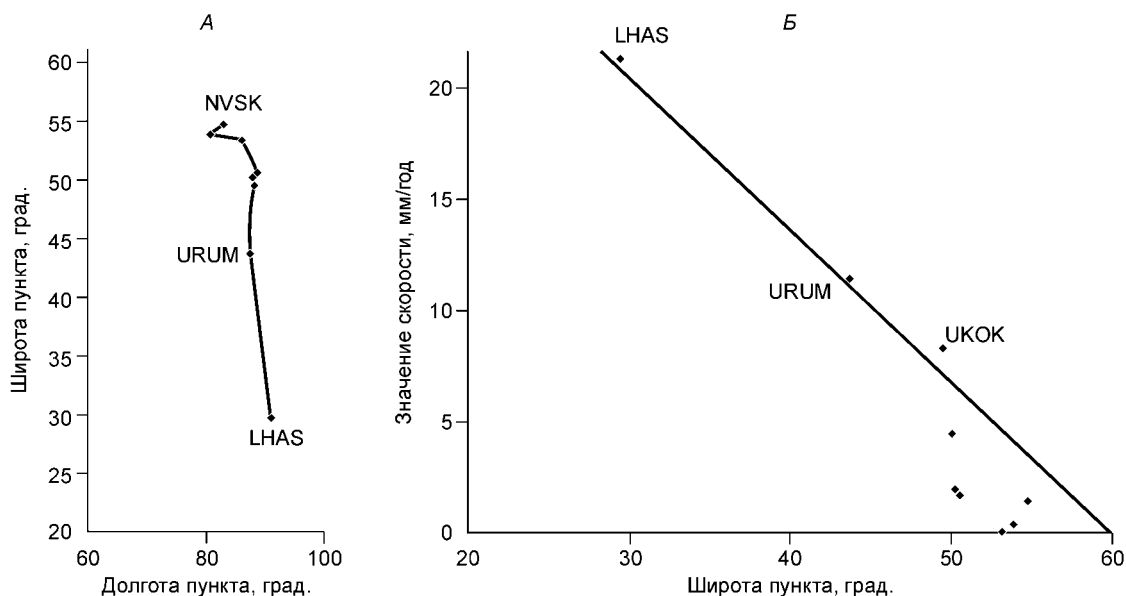


Рис. 4. *А* — положение постоянных станций Азии (Лхаса, Урумчи, Ключи-Новосибирск) и станций, расположенных около очага землетрясения 27.09.2003 г. и на равнинной части сети; *Б* — скорость смещения на север (мм/год) относительно п. Ельцовка (скорость 0 мм/год).

Картирование разломов, активных в современную эпоху, является сложной задачей и можно отметить, что на рассматриваемой территории Горного Алтая и его окружения имеются разломы, ориентированные на СЗ, С и СВ, а на северо-востоке (от оз. Телецкое на восток) территория ограничена Западно-Саянским разломом широтного простирания [33]. Рассмотрим поведение северной компоненты горизонтальной скорости на профиле с юга на север — от станции Лхаса (Тибет), через Урумчи (Западный Китай) и далее через эпицентральной область на юге Горного Алтая до равнинной части на севере исследуемого региона, т. е. по параллельному направлению, ортогональному границе зоны активных современных движений Азии (см. рис. 2). Положение станций профиля и изменение скорости приведено на рис. 4. Здесь отмечается резкое падение значений после пункта UKOK (плато Укок), т. е. перед эпицентральной зоной будущего землетрясения. Поведение графика для станций на севере (NVSK, ELTS, KRUT) аналогично. Представленные данные (см. рис. 4, Б) позволяют выделить постоянную составляющую в смещении на север, изменяющуюся с юга на север от 20—22 мм в год (широта 29,6°) до 0—2 мм в год на широтах 57—61°. Поведение этой компоненты в целом соответствует моделям внутриплитных смещений по геологическим моделям [8, 9]. Значение скорости деформации по линии север—юг составляет 0,7 мм на градус широты в год или $6 \cdot 10^{-9}$ в год или $2 \cdot 10^{-16} \text{ с}^{-1}$. Полученный эффект и его величина, возможно, отражают течение вещества литосферы Азии в северном направлении от зоны контакта Индийской плиты до области на севере, где скорости гасятся. На широте Горного Алтая в смещениях начинают доминировать широтные компоненты (см. рис. 2, Б), что соответствует ориентации разломов по границе зоны активных деформаций юга Сибири и Монголии.

Решение для скоростей относительно северных станций (ELTS, KRUT, NVSK) показывает наличие смещений в СЗ направлении и появление в южной и юго-восточной частях смещений на СВ (см. рис. 3). Поле горизонтальных скоростей для Горного Алтая свидетельствует о наличии растяжений по долготе. Возможно, здесь также проявляются особенности структуры (геометрия разломной сети) и различие реологических параметров блоков земной коры Горного Алтая. Сложность рассмотрения составляющей по широте в том, что здесь широтное тектоническое течение, связанное с „вековой“ составляющей, накладывается на эффекты, вызванные процессами подготовки сильного землетрясения и конфигурацией разломов.

Аномалии в поле скоростей перед землетрясением — это два доминирующих направления смещений на юге региона — СВ и СЗ (см. рис. 3). Это заключение основано на наиболее надежных результатах анализа по измерениям на пунктах сети, представленных за три года (2000—2003) (см. табл. 1). Из анализа данных по Алтайской сети относительно станций NVSK, KRUT, ELTS, расположенных на равнине в 500 км от очага землетрясения, выделяется зона на границе областей смещения на СЗ и СВ, где происходит резкий поворот векторов скоростей. Эта зона совпадает с зоной эпицентров Чуйского землетрясения и его афтершоков. В южной части (вблизи монгольской границы) северо-восточное направление скоростей

согласуется с направлением движений по GPS-данным в северо-западной части Монголии (5—6 мм/год) и Китая (Урумчи, 10 мм/год) (см. рис. 2,Б). Определение поля деформаций по данным 2000—2003 гг. с учетом ошибок измерений и анализа нам кажется затруднительным из-за очень малых величин полученных смещений (0,5—2,0 мм). Следует выделить лишь растяжение в азимуте СЗ величиной до $5 \cdot 10^{-8}$ в год, прослеживаемое по линии пунктов CHAG—KURA—ULAG—CHIK—SEMI—USTK и сжатие в направлении на СВ величиной до $2 \cdot 10^{-7}$ в год, прослеживаемое по линии пунктов UKOK—CHAG—YAZU (см. рис. 3).

Отметим еще одну особенность поля смещений, а именно, значимое различие величины и ориентации смещений на пунктах КАИТ и КАУТ, расположенных на расстоянии 1,8 км друг от друга (см. рис. 3). Этот факт можно объяснить эффектом сползания осадочных пород террасы (КАИТ) в сторону р. Катунь и наличием локальных разломов в этом регионе. Стабильный пункт КАУТ расположен на скальных породах в 2 км от реки, а его смещение соответствует в целом движению на СЗ группы пунктов USTK, SEMI, CHIK, ULAG, KURA в период 2000—2003 гг.

ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИЕ СМЕЩЕНИЯ

После Чуйского землетрясения опрос по пунктам геодинамической сети Горного Алтая был начат весной 2004 г. В мае удалось провести измерения на двух пунктах (KURA, CHAG), расположенных в эпицентральной области, и на одном (ARTВ) в 200 км севернее. В июле 2004 г. была опрошена вся алтайская часть сети, а в августе — пункты в Западном Саяне. Максимальная величина постсейсмических смещений была получена после обработки результатов для станций в 100-километровой зоне вблизи эпицентральной области (рис. 5, разломная сеть дана по [34]). Результаты обработки майских и июльских измерений с помощью программ анализа GAMIT-GLOBK совпадают в пределах 5 мм. Обнаружена зависимость смещений от расстояния до нодальной плоскости землетрясения, проходящей через эпицентр (см. рис. 5). Смещения от 300 мм в 15 км от линии разрыва уменьшаются до 25 мм в 90 км. Вертикальные смещения также достигают максимальных значений (30—50 мм) для трех станций (CHAG, KURA, UKOK)

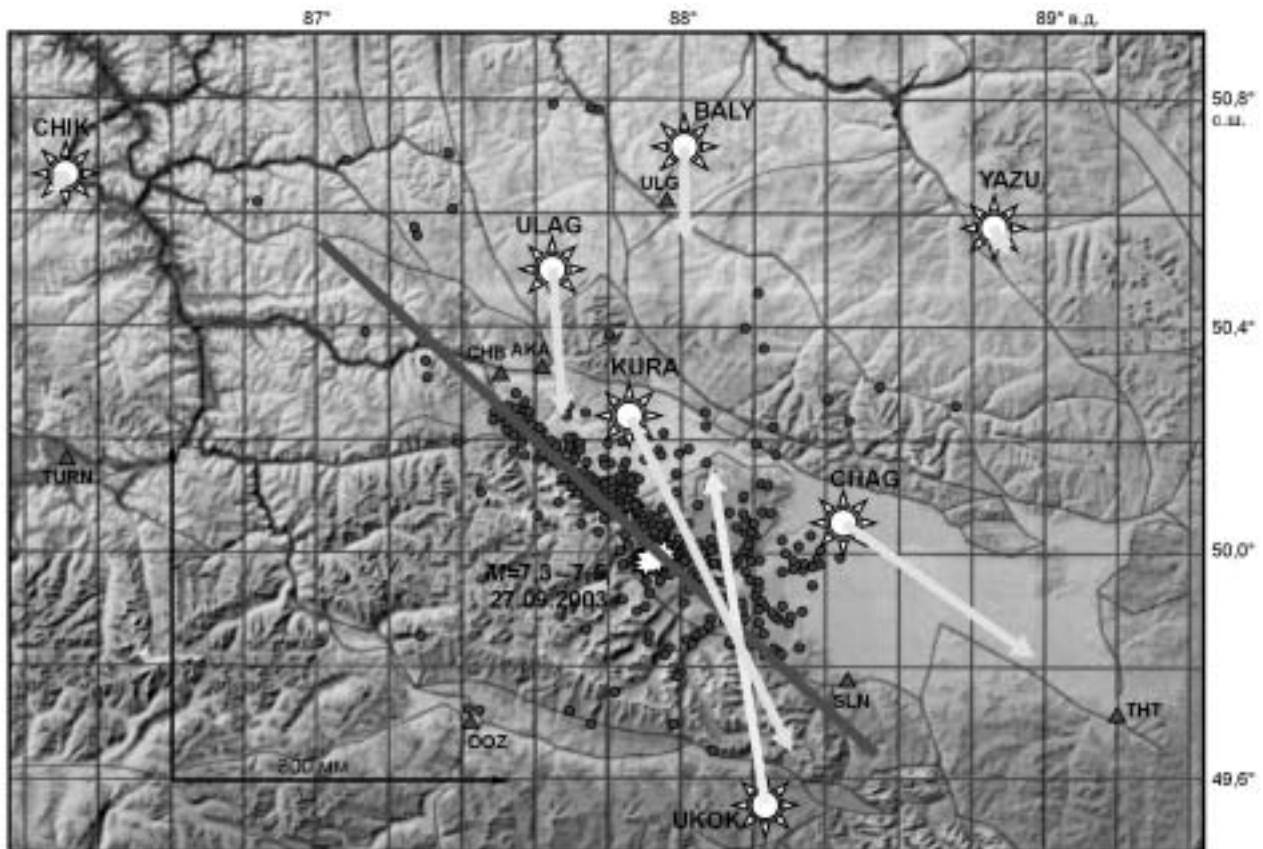


Рис. 5. Горизонтальные постсейсмические смещения пунктов в ближней зоне (2003—2004 гг.).

Показано положение эпицентра землетрясения 27.09.2003 г. (белая звездочка) и его афтершоков (зеленые точки), приведено положение нодальной плоскости (красная линия). Треугольники — сейсмостанции, голубые стрелки — косейсмические смещения GPS-пунктов, желтой стрелкой выделено смещение юго-западного крыла разрыва (плато Укок) на ССЗ.

вблизи разрыва. Постсейсмические смещения для станций сети в дальней зоне не превышают 10 мм. По результатам для постсейсмических смещений в зоне разрыва выделяется правостороннее смещение на разломе. По эффектам первого порядка, отражающим правосторонний сдвиг, можно предложить для интерпретации смещений модель упругой отдачи для Чуйского землетрясения. Эффекты на порядок меньше (десятки миллиметров) как для горизонтальных, так и для вертикальных смещений отражают осложняющие эффекты второго порядка (кривизну линии разрыва и наличие на отдельных участках надвиговой компоненты, известное из анализа афтершоков). Наличие перед землетрясением к северу и северо-западу от эпицентра смещений на северо-запад (см. рис. 3), а после события — смещений на юго-восток северного крыла и на северо-запад южного крыла разрыва (см. рис. 5) прямо указывают на возможность использования модели упругой отдачи. Смещения после землетрясения вызваны их блокировкой и деформированием среды в зоне будущего разрыва. Так, если обратиться к графику скорости СЮ перед событием (см. рис. 4), то дефицит скорости составляет около 5 мм в год. Рассматривая список сильных землетрясений Алтае-Саянской области [35], можно отметить, что предыдущее сильное землетрясение в пределах исследуемой области произошло приблизительно 250 лет назад (09.12.1761; $M = 7,7$; $50,0^\circ$ с.ш., $90,0^\circ$ в.д.). Оценка дефицита накопленных смещений на север составляет около 1,25 м или порядка 2 м в нодальной плоскости, что приблизительно соответствует значению сейсмического момента для землетрясения 10^{20} Н·м [3—5]. Рассмотрим подробнее возможные модели смещений земной поверхности в эпицентральной зоне.

МОДЕЛИ СМЕЩЕНИЙ

При многих землетрясениях происходит быстрое относительное перемещение противоположных сторон разрыва. Такое движение ясно выражено при землетрясении 1906 г. в Сан-Франциско [36] и при Гоби-Алтайском землетрясении 1957 г. [37]. Землетрясение в Сан-Франциско положило начало разработке дислокационной теории землетрясений — подробной математической формулировки теории упругой отдачи [14, 36, 38]. В этой теории рассматриваются напряжения и деформации, связанные со скольжением по разлому. Если известна величина перемещения на поверхности разлома, то можно вычислить изменение напряжений, деформаций и смещений в каждой точке среды. В случае двумерной модели, т. е. в предположении, что в одном измерении поверхность разлома бесконечна, можно построить несколько решений.

Согласно теории упругой отдачи в модели винтовой дислокации (обозначим ее как модель 1), события развиваются так, как показано на рис. 6, А. Здесь использованы обозначения: $\Delta\omega$ — смещение бортов разлома, a — глубина разлома, начало координат в точке, расположенной на глубине a . Проскальзывание вдоль разрыва, выходящего на поверхность, аналогично смещениям в винтовых дислокациях, как показано на рис. 6. Следует отметить, что при одиночной дислокации смещения постоянны по всей плоскости разрыва (см. рис. 6, А) и с физической точки зрения модель непригодна (смещения вдоль оси z ($x = 0, y = 0$) должны быть равны нулю). Скачок смещений у нижнего края площадки разрыва означает, что вдоль края напряжения бесконечны. Необходимо учесть, что реально смещения в плоскости разрыва обращаются в нуль на нижнем крае площадки разрыва (см. рис. 6, Б). Этому соответствует сложная система дислокаций, которую можно рассматривать как наложение большого числа малых дислокаций, линии которых параллельны и лежат в плоскости разрыва. Для простой винтовой дислокации в безграничной среде вдоль окружности, центр которой лежит на линии дислокации, сдвиговые деформации постоянны (см. рис. 6, А). Если радиус окружности $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$, то при скольжении вдоль разлома на величину $\Delta\omega$ сдвиговая деформация на окружности равна $\Delta\omega/2\pi r$. Нас интересует компонента сдви-

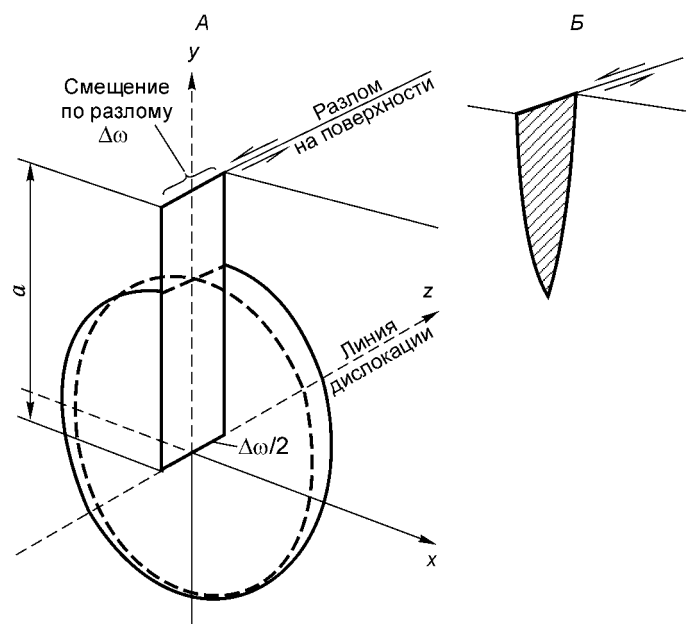


Рис. 6. Модель винтовой дислокации — модель 1.

Простираение разлома по оси z . Глубина разлома — a , смещение по разрыву — $\Delta\omega$. А, Б — пояснения см. в тексте.

говой деформации, описывающая изменение угла между направлениями x и z . В нашем случае она равна $(\Delta\omega/2\pi r) (y/r)$. Чтобы учесть влияние свободной поверхности $y = a$, нужно так изменить поле напряжений, чтобы при $y = a$ напряжения обращались в нуль. Для этого нужно воспользоваться методом изображений и добавить поле дислокации, расположенной на расстоянии a над свободной поверхностью (при $y = 2a$). Тогда для интересующей нас сдвиговой дислокации на свободной поверхности ($y = a$) получим [14]:

$$\varepsilon_{y=a} = (\Delta\omega/2\pi) [y/(x^2 + y^2) + (2a - y)/((2a - y)^2 + x^2)]_{y=a} = \Delta\omega a / [\pi(a^2 + y^2)]. \quad (1)$$

Первый член описывает деформации, вызванные самой дислокацией, а второй учитывает влияние свободной поверхности (изображения дислокации). Смещения на поверхности получаются интегрированием по x (нужно помнить о скачке смещений при $x = 0$):

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

Рассмотрим более точную модель смещений во время землетрясений при образовании разломов со смещением по протиранию (модель 2). Попробуем определить деформации, возникающие в результате смещения на разломе. В рамках теории упругости рассмотрим полупространство $y > 0$, в котором первоначально имеется однородное сдвиговое напряжение $\sigma_{xz,0}$ (рис. 7, А). Начало осей координат лежит на поверхности полупространства, будущая трещина простирается по оси z . Далее в плоскости $x = 0$ возникает двумерная трещина, идущая от поверхности до глубины $y = a$. При появлении трещины возникают смещения (см. рис. 7, Б). Возникающее поле деформаций может служить моделью деформации, вызванной землетрясением на разломе со смещением по протиранию. Предположим, что имеется только одна ненулевая компонента ω_z смещения в направлении оси z . После образования трещины появляются две ненулевые компоненты напряжения: σ_{xz} (и σ_{zx}) и σ_{yz} (и σ_{zy}). Пренебрегаем напряжением трения на разломе после землетрясения и положим $\sigma_{xz} = 0$ при $x = 0, 0 \leq y \leq a$. Поля смещений и напряжений в данной двумерной задаче не зависят от z . Изменение поля смещений при землетрясении происходит быстро, т. е. можно использовать реологию Гука.

Для определения напряжений, смещений и деформаций в полупространстве $y > 0$ нужно вывести дифференциальное уравнение, выражающее равновесие сил на элемент среды. Уравнение равновесия для сил в направлении z можно записать в следующей форме:

$$\partial\sigma_{xz} / \partial x + \partial\sigma_{yz} / \partial y = 0. \quad (3)$$

Величины σ_{xz} и σ_{yz} можно выразить через производные смещения, где G — модуль сдвига земной коры:

$$\sigma_{xz} = G \cdot \partial\omega_z / \partial x, \quad \sigma_{yz} = G \cdot \partial\omega_z / \partial y. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в уравнение (3), получаем:

$$\partial^2\omega_z / \partial^2x + \partial^2\omega_z / \partial^2y = 0. \quad (5)$$

Таким образом, смещение ω_z удовлетворяет уравнению Лапласа.

Решение, описывающее смещение перед образованием трещины, имеет простой вид

$$\omega_z = (\sigma_{xz,0} / G) \cdot x. \quad (6)$$

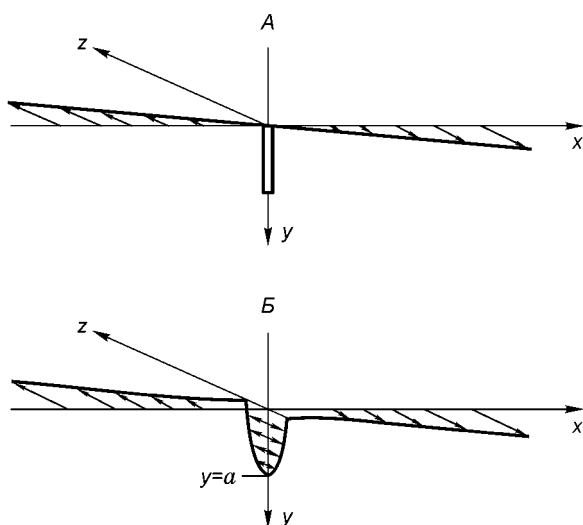


Рис. 7. Модель смещения по разлому — модель 2.

А — разлом заперт, показано смещение блоков земной коры, Б — смещение по разрыву глубины a .

После образования трещины смещение описывается решением уравнения Лапласа со следующими граничными условиями:

$$\partial\omega_z / \partial y = 0 \text{ при } y = 0, \quad (7)$$

$$\partial\omega_z / \partial x = 0 \text{ при } x = 0, 0 < y < a, \quad (8)$$

$$\omega_z = 0 \text{ при } x = 0, a < y, \quad (9)$$

$$\omega_z \rightarrow (\sigma_{xz,0} / G) \cdot x \text{ при } x \rightarrow \infty. \quad (10)$$

Решение уравнения Лапласа с граничными условиями (7) — (10) находится с помощью методов теории функций комплексного переменного [38]. Решение для напряжений в плоскости трещины получается в следующем виде [38]:

$$\sigma_{xz} = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq y < a, \\ -\sigma_{xz,0} \cdot y / (y^2 - a^2)^{1/2} & \text{при } y > a, \end{cases} \quad (11)$$

$$\sigma_{yz} = \begin{cases} -\sigma_{xz,0} \cdot y / (a^2 - y^2)^{1/2} & \text{при } 0 \leq y < a, \\ 0 & \text{при } y > a. \end{cases} \quad (12)$$

На кончике трещины оба напряжения обращаются в бесконечность. На поверхности $y = 0$ напряжения равны

$$\sigma_{xz} = \pm \sigma_{xz,0} \cdot x / (x^2 + a^2)^{1/2}, \quad (13)$$

$$\sigma_{yz} = 0. \quad (14)$$

При $x \rightarrow \infty$ получаем $\sigma_{xz} = \sigma_{xz,0}$.

Смещение поверхности, обусловленное образованием трещины, получаем в виде

$$\Delta\omega_z = \pm \sigma_{xz,0} \cdot [(x^2 + a^2)^{1/2} - |x|] / G. \quad (15)$$

Отсюда получаем относительное смещение бортов разлома:

$$\Delta\omega_{z0} = 2a \cdot \sigma_{xz,0} / G. \quad (16)$$

А сопровождающее землетрясение смещение поверхности в функции расстояния от разлома можно записать как

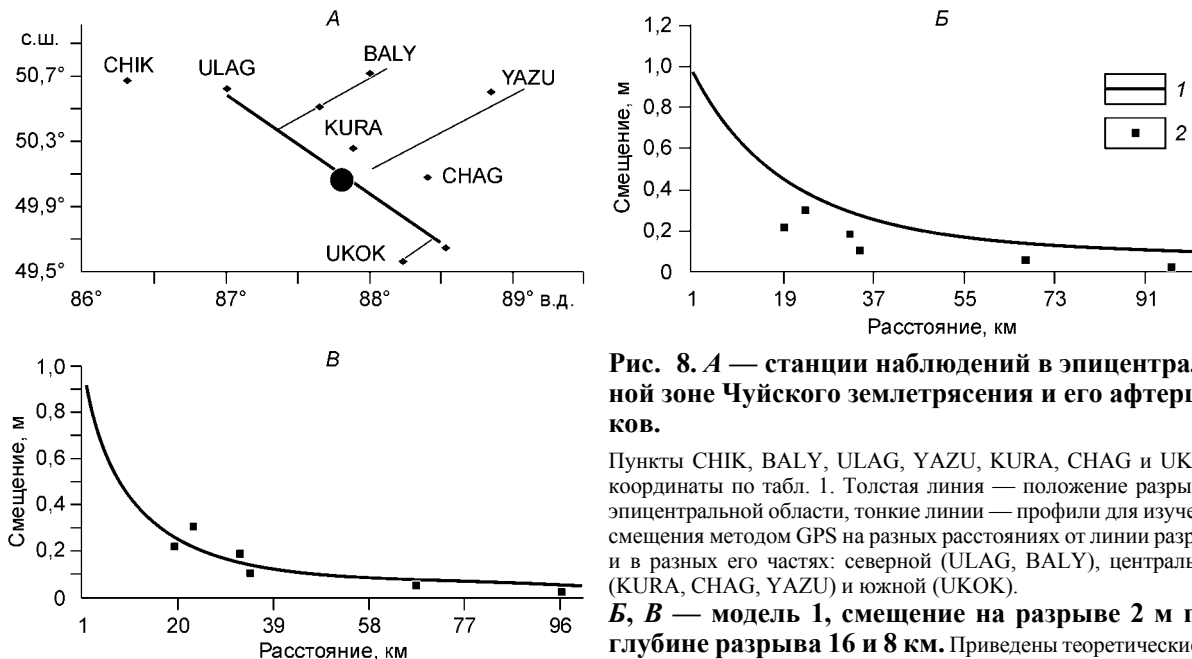


Рис. 8. А — станции наблюдений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения и его афтершоков.

Пункты CHIK, BALY, ULAG, YAZU, KURA, CHAG и UKOK, координаты по табл. 1. Толстая линия — положение разрыва в эпицентральной области, тонкие линии — профили для изучения смещения методом GPS на разных расстояниях от линии разрыва и в разных его частях: северной (ULAG, BALY), центральной (KURA, CHAG, YAZU) и южной (UKOK).

Б, В — модель 1, смещение на разрыве 2 м при глубине разрыва 16 и 8 км. Приведены теоретические (1) и экспериментальные (2) значения.

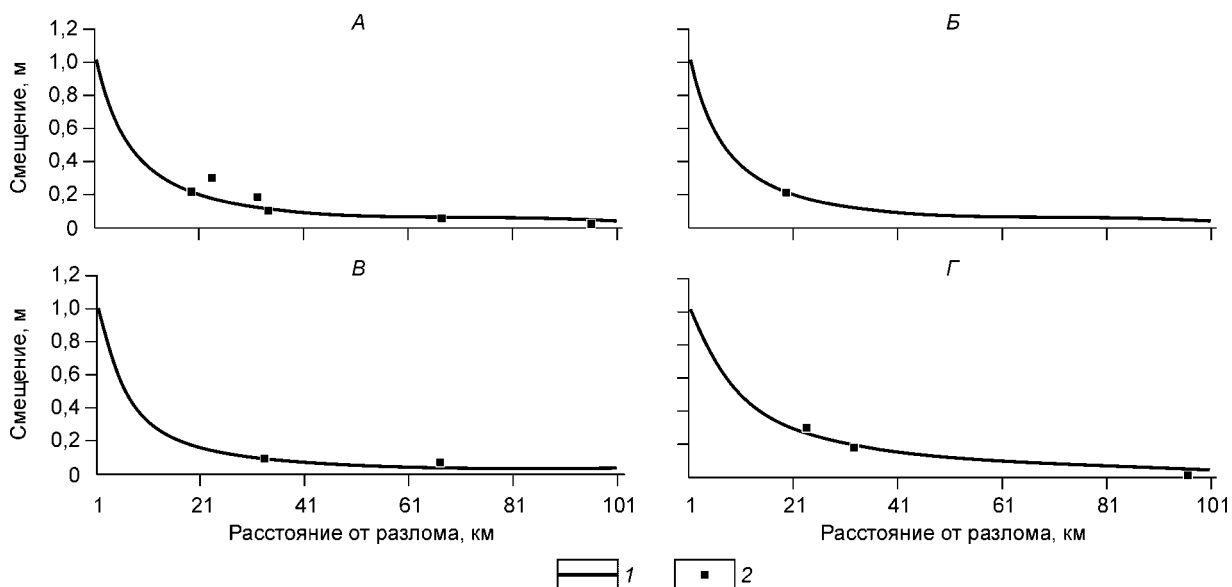


Рис. 9. А — модель 2, смещение на разрыве 2 м при глубине разрыва 8 км; Б — северный профиль — смещение 2 м и глубина 6,5 км; В — южный профиль — смещение 2 м и глубина 8 км; Г — центральный профиль — смещение 2 м и глубина 13 км.

Приведена теоретическая кривая (1) и экспериментальные значения (2).

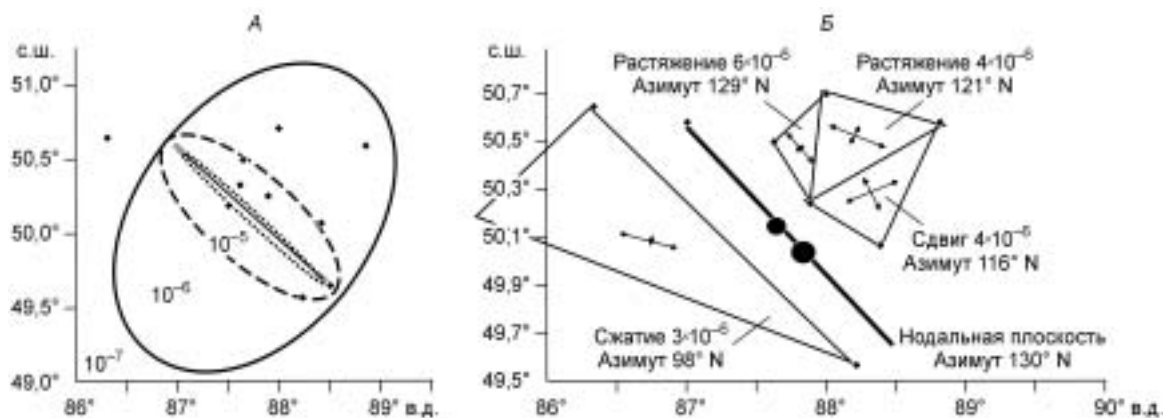


Рис. 10. А — снятые сдвиговые деформации в эпицентральной зоне, вычисленные по модели 2, на краях трещины деформации до 10^{-3} .

Показаны зоны деформаций различного уровня.

Б — деформации в эпицентральной зоне по экспериментальным определениям (2003—2004 гг.).

Зоны сжатия и растяжения по краям трещины, в центре сдвиговая деформация.

$$\Delta\omega_z = \pm \Delta\omega_{z0}[(1 + x^2/a^2)^{1/2} - |x|/a] / 2. \quad (17)$$

Используем полученные соотношения для определения параметров Чуйского землетрясения. Рассмотрим изменение составляющей горизонтальной компоненты смещения, параллельной нодальной плоскости 130° N, в зависимости от расстояния пункта до нодальной плоскости. Распределение пунктов вблизи эпицентральной зоны показано на рис. 8, А, здесь же показано положение нодальной плоскости и положение трех профилей, ортогональных линии разрыва, — северного, центрального и южного. На рис. 8, Б, В приведены экспериментальные значения смещений по всем шести пунктам и теоретические распределения по моделям 1 и 2 при глубинах разрыва 8 и 15 км, полученные с помощью соотношений (2) и (17). Полученные графики показывают лучшее соответствие экспериментальных значений модели 2 при глубине 8 км. Смещение на разрыве мы оцениваем в 2 м. Эта оценка соответствует геоморфологическим исследованиям (от 0,2 до 5 м) и сейсмологическим данным для сейсмического момента.

Распределение смещений по модели 2 при смещении на разрыве в 2 м по трем профилям позволяет оценить глубину разрыва на севере, в центре и на юге. Как показано на рис. 9, *A—B*, оценка глубины изменяется от 10—15 км в центре до 5—8 км на флангах эпицентральной зоны. Глубина в 8 км соответствует среднему значению, полученному по сейсмологическим определениям для афтершоков Чуйского землетрясения. Оценка величины снятых сдвиговых напряжений оказалась на уровне 40 МПа при модуле сдвига в 30 ГПа (соотношение — 16). Сдвиговая деформация на земной поверхности, вычисленная по модели 2 (на базе 1 км, на краях разлома деформация вычислялась при глубине 1 км), приведена на рис. 10, *A*. Зона максимальных деформаций (10^{-3}) расположена на концах трещины, а зона деформаций уровня 10^{-6} простирается до 100 км от линии разрыва. Экспериментальные снятые деформации земной поверхности в ближней зоне определялись по сети пунктов на северном и южном крыльях разрыва, при известных упрощениях [38]. Выделены зоны сжатия ($3 \cdot 10^{-6}$ для треугольника UKOK—CHIK—KAYT), зоны чистого сдвига ($4 \cdot 10^{-6}$ для треугольника KURA—CHAG—YAZU) и зоны растяжения ($6 \cdot 10^{-6}$ для треугольника KURA—BALY—ULAG и $4 \cdot 10^{-6}$ для треугольника KURA—BALY—YAZU) (см. рис. 10, *B*). Распределение деформаций соответствует модели смещений и параметрам очага землетрясений (см. табл. 3) — зонам сжатия и растяжения на краях разрыва. Эти определения, конечно, в определенной степени можно рассматривать как оценочные, так как нельзя исключить смещения мелких блоков в эпицентральной зоне, на что указывает наличие эффектов второго порядка в горизонтальных смещениях (см. рис. 3) и существование значительных разнонаправленных вертикальных смещений в эпицентральной зоне (например, для пунктов KURA и CHAG).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом исследований является впервые полученное 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 позволил: получить картину современных движений всей активной части Центральной и Восточной Азии; выявить закономерности современного деформирования земной коры; рассматривать вопрос о влиянии Индо-Азиатской коллизии; изучать особенности проявления коллизии на ее северной границе — областей активных современных процессов на Алтае, в Туве и в Байкальской рифтовой зоне. Важным итогом работы является получение поля скоростей перед сильнейшим Чуйским землетрясением на юге Горного Алтая, которым выявлены аномалии в распределении скоростей современных движений земной коры. Изменение ориентации скоростей горизонтальных движений выделено в зоне будущего землетрясения. В поле скоростей Горного Алтая присутствует 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 4 мм/год, и только на юге скорости возрастают до 5—10 мм/год (2000—2003 гг.). Изучение постсейсмических смещений позволило выделить смещения до 300 мм в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения. Распределения смещений после землетрясения (правосторонний сдвиг в эпицентральной части) и 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 смещения на линии разрыва (2 м), глубину разрыва (от 5 до 15 км в разных частях эпицентральной зоны) и сделать оценку сдвиговых напряжений в 4 МПа. Как показали представленные результаты, при землетрясениях $M > 7$ измеримые смещения земной коры охватывают территорию в несколько сотен километров. Деформации земной коры, снятые при землетрясении в зоне до 100 км, достигают единиц на 10^{-6} .

Исследования выполнены при поддержке РФФИ гранты (04-05-64291а, 05-05-79161к), интеграционного проекта Президиума РАН № 13.14, проектов отделения наук о Земле № 6.5.1, СО РАН № 101, ВМТК ОИГГиМ СО РАН № 1734, № 1739.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Дучков А.Д. и др. Космогеодезические исследования современной геодинамики западной части Алтае-Саянской области // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (11), с. 1208—1215.
2. Тимофеев В.Ю., Запеева Е.А., Ардюков Д.Г. Мониторинг современных горизонтальных движений Алтая // Современные проблемы геодезии и оптики: Сб. материалов ЛШ конференции, Ч. III. Новосибирск, СГГА, 2003, с. 217—219.
3. <http://neic.usgs.gov/neis/FM/neic-zfak-g.html>

4. **Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др.** Чуйское землетрясение 2003 года ($M = 7,5$) // Электронный научно-информационный журнал „Вестник отделения наук о Земле РАН“, 2003, № 1 (21).
5. **Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Габсатарова И.П.** Параметры землетрясения 27 сентября 2003 года на Алтае по инструментальным данным // Электронный научно-информационный журнал „Вестник отделения наук о Земле РАН“, 2003, № 1 (21).
6. **Peltzer G.** Centrifuge experiments of continental scale tectonics in Asia // *Bull. Geol. Inst. Uppsala*, 1988, v. 14, p. 115—128.
7. **Peltzer G., Tapponnier P.** Formation and evolution of strike-slip faults, rift, and basins, during the India-Asia collision: an experimental approach // *J. Geophys. Res.*, 1988, v. 93, p. 15085—15117.
8. **Peltzer G., Tapponnier P., Armijo R.** Magnitude of Late Quaternary left-lateral displacements along the north edge of Tibet // *Science*, 1989, v. 246, p. 1285—1289.
9. **Peltzer G., Saucier F.** Present-day kinematics of Asia derived from geologic fault rates // *J. Geophys. Res.*, 1996, v. 101, № B12, p. 27943—27956.
10. **Allen C.R., Luo Z., Qian H. et al.** Field study of a highly active fault zone: the Xianshuihe fault of southwestern China // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1991, v. 103, p. 1178—1199.
11. **Armijo R.** Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet // *J. Geophys. Res.*, 1989, v. 94, p. 2787—2838.
12. **Саньков В.А., Леви К.Г., Кале Э. и др.** Современные и голоценовые горизонтальные движения на Байкальском геодинамическом полигоне // *Геология и геофизика*, 1999, т. 40 (3), с. 422—430.
13. **Calais E., Vergnolle M., Deverchere J. et al.** Are post-seismic effects of the M8.4 Bolnay earthquake (1905 July 23) still influencing GPS velocities in the Mongolia-Baikal area? // *Geophys. J. Int.*, 2002, v. 149, p. 157—168.
14. **Стейси Ф.** *Физика Земли*. М., Мир, 1972, 342 с.
15. **Burgmann R., Frolov D.I., Egorov S.G. et al.** Rapid aseismic moment release following the 5 December, 1997 Kronotsky, Kamchatka, earthquake // *Geophys. Res. Lett.*, 2001, v. 28, № 5, p. 1331—1334.
16. **Kogan M.G., Steblov G.M., King R.W. et al.** The 2000 Mw 6.8 Uglegorsk earthquake and regional plate boundary deformation of Sakhalin from geodetic data // *Geophys. Res. Lett.*, 2003, v. 30, № 3, p. 1102—1105.
17. **Стеблов Г.М.** Крупномасштабная геодинамика на основе космической геодезии: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., ИФЗ РАН, 2004, 32 с.
18. **Boucher C., Altamimi Z., Sillard P., Feissel-Vernier M.** The ITRF 2000 // *IERS Technical Note*, 2001, № 31, 270 p.
19. **Timofeev V.Y., Ardukov D.G., Zapreeva E.A. et al.** Altay GPS and gravity network for geodynamic studies // *Proceedings of the International Seminar „On the Use of Space Techniques for Asia-Pacific Regional Crustal Movements Studies“*. APSG-Irkutsk, RAS IA, GEOS, Moscow, 2002, p. 127—134.
20. **Boucher C., Altamimi Z., Sillard P.** Results and analysis of the ITRF97 // *IERS Technical Note*, 1999, v. 27, 191 p.
21. **Roosbeek F., Bruyninx C.** Novosibirsk GPS data analysis // *Abstract. EGS XXVII General Assembly*. Nice, France, April 2002, Session G9.03 Evolving space geodesy techniques.
22. <http://sopac.ucsd.edu>
23. <http://sidesshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/NVSK.html>
24. **Drewes H.** Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models / M. Feissel (Ed.) // *Geodynamics, IAG Symposia*, Springer, 1998, p. 35—55.
25. <http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/geodis/GDYN/platemodels/html>
26. **De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.** Current plate motions // *Geophys. J. Int.*, 1990, v. 101, p. 55—68.
27. **Argus D.F., Gordon R.G.** No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1 // *Geophys. Res. Lett.*, 1991, № 18, p. 2039—2042.
28. **De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F. et al.** Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // *Geophys. Res. Lett.*, 1994, v. 21, № 20, p. 2191—2194.
29. **Calais E., Lesne O., Vergnolle M. et al.** GPS Measurements of active crustal deformation in Central Asia (Baikal—Mongolia—Altay) // *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Geodynamics and Environmental Problems of High-Mountain Regions*. Bishkek, Kyrgyzstan, October, 2002, p. 50—58.
30. **Qi Wang, Pei-Zhen Zhang, Freymeller J.T. et al.** Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements // *Science*, 2001, v. 294, p. 574—577.
31. <http://www-gpsg.mit.edu/simon/gtgk/index.html>

32. Тимофеев В.Ю., Дучков А.Д., Запреева Е.А., Ардюков Д.Г. Поле скоростей современных движений земной коры Горного Алтая перед сильным землетрясением ($M = 7,3$) // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии, Вып. 1. Иркутск, 2004, с. 145—152.
33. Карта активных разломов СССР и сопредельных территорий / Ред. В.Г. Трифонов. М., ГИН АН СССР, ИЗК СО АН СССР, 1986.
34. Новиков И.С., Еманов А.Ф., Еманов А.А. и др. Сдвиговая модель неотектонической структуры Алтая и ее проверка по результатам интерпретации данных сейсмической активизации 2003 г. // Алтайское (Чуйское) землетрясение: прогнозы, характеристики, последствия: Материалы научно-практической конференции. Горно-Алтайск, Горно-Алтайский ун-т, 2004, с. 15—20.
35. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. М., Наука, 1977, 413 с.
36. Reid H.F. The elastic rebound theory of earthquakes // Bull. Dept. Geology. Univ. California, 1911, v. 6, p. 297—314.
37. Гоби-Алтайское землетрясение / Под ред. Н.А. Флоренсова, В.П. Солоненко. М., Изд-во АН СССР, 1963, 395 с.
38. Turcott D.L., Schubert G. Geodynamics. Applications of continuum physics to geological problems. V. 2. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, John Wiley & Sons, 1982, 730 p.

*Рекомендована к печати 28 сентября 2005 г.
С.В. Гольдиным*

*Поступила в редакцию 5 марта 2005 г.,
после доработки — 6 сентября 2005 г.*