

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. Запорева,
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 геодинамическая 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	Балыктуоль (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	Тунджа 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 APKIM	-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 гг.) 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 BERNES. Станции включены в систему IGS (International GPS Service), а положение станции NVSK рассматривается в системе ITRF2000.

Первый анализ проводился по программе BERNES 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