

СОВРЕМЕННЫЕ СКОРОСТИ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ ГОРНОГО АЛТАЯ И ЗАПАДНОГО САЯНА

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Елена Валерьевна Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Екатерина Ивановна Грибанова

Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, научный сотрудник

Возможность измерять горизонтальные смещения земной коры Горного Алтая и Западных Саян с высокой точностью появилась в последние десятилетия с распространением методов космической геодезии. Из осложняющих факторов следует отметить современный сейсмический процесс. В результате определены скорости смещений в эпоху с 2000 года по 2012 год для западной части Горного Алтая 1.2 мм/год на ССЗ и западной части Саянского региона 1.1 мм/год на СВВ.

Ключевые слова: скорости современных горизонтальных смещений, космическая геодезия, Алтае-Саянский регион.

RECENT DISPLACEMENT RATES OF GORNII ALTAI AND WEST SAYAN

Anton V. Timofeev

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Researcher, tel. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Dmitrii G. Ardyukov

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Elena V. Boyko

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, Ph. D., Researcher, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Vladimir Yu. Timofeev

Altay-Sayan branch of Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptyug Prospect, D. Sc., e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Ekaterina I. Gribanova

Siberian branch of the Federal research center «Geophysical survey of RAS», 630090, Russia, Novosibirsk, 13/3 Lavrentiev Prospect, Researcher

Measurement's possibility of horizontal displacement for Gornii Altai crust appeared by space geodesy method at last decades. It is difficult to study these values mixed with seismicity effects. Recent displacement rates are defined for West Altai 1.2 mm/y to NNW and for West Sayan 1.1 mm/y to NEE (epoch 2000-2012 yy).

Key words: recent horizontal displacement rates, space geodesy, Altai-Sayan region.

Целью работы являлось изучение распределения скоростей горизонтальных смещений Алтае-Саянского региона. Исследование полей современных смещений земной коры в Алтае-Саянском регионе до 2000 года проводилось только методами классической геодезии - в основном нивелированием, с частотой опроса 20÷30 лет, т.е. определялась вертикальная составляющая скорости, осредненная на продолжительном интервале времени [1]. Начиная с 2000 года, ежегодные измерения проводятся с использованием технологий космической геодезии - метода GPS [2, 3, 4]. Современная картина смещений для территории Горного Алтая и Саян определяется несколькими эффектами – тектоническими, связанными в основном с влиянием коллизии Индийской и Евроазиатской плит, и быстрыми сейсмическими, связанными с сильными землетрясениями региона [5, 6]. Регион Саяны-Тува - это зона перехода от области субмеридионального сжатия Горного Алтая на западе, к Байкальской рифтовой зоне растяжения на востоке. Сеть пунктов измерений закладывалась в регионе с 2000 по 2003 год, использовались в основном скальные репера с жесткой центровкой антенн (рисунок). Точность полученных результатов при использовании комплектов геодезических двухчастотных приемников при одновременном многосуточном сетевом опросе и последующей обработке, используя программный пакет GAMIT-GLOBK, может достигать долей миллиметра.

Для определения региональных скоростей смещений необходимо исключить плитное движение. Рассматриваем тектонические плиты как абсолютно твердые, при этом, движение плит на сфере описывается как вращения вокруг полюса Эйлера. В модели использованы следующие параметры: координаты полюса Эйлера, Φ – широта (с.ш.), Λ – долгота (в.д.), ω - угловая скорость в градусах за миллион лет и координаты пункта наблюдений. В рамках модели вращения плиты на сфере, для определения скоростей горизонтальных смещений пункта с координатами φ и λ использованы соотношения:

$$V = \Omega \times R \times \sin D, \quad (1)$$

$$V_n = V \times \sin \alpha; \quad V_e = V \times \cos \alpha, \quad (2)$$

где Ω – угловая скорость в радианах, R – радиус Земли, эпицентральный угол $D = \arccos[\sin \varphi \cdot \sin \Phi + \cos \varphi \cdot \cos \Phi \cdot \cos(\Lambda - \lambda)]$, угол вектора скорости

$$\alpha = \arctg \sin(\lambda - \Lambda) / \{[\sin(90 - \varphi) / \tan(90 - \Phi)] - \cos(90 - \varphi) \cdot \cos(\lambda - \Lambda)\}.$$

Параметры моделей Евразии, используемые в работе, приведены в табл. 1. Положение пунктов геодинимической сети Алтае-Саянской области показаны на рисунке.

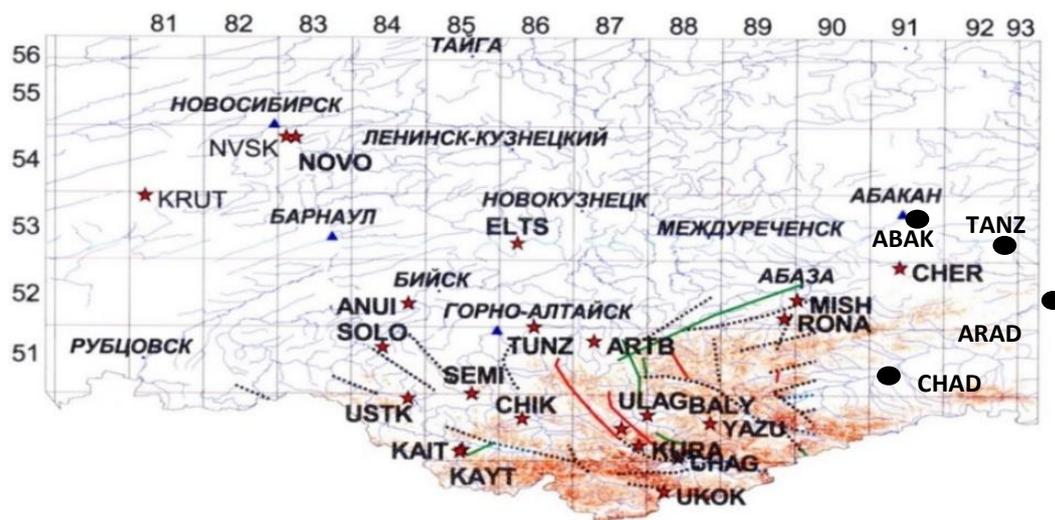


Рис. Алтае-Саянская геодинимическая сеть GPS измерений (пункты ИНГГ СО РАН - звёздочка), восточная часть сети – пункты ИЗК СО РАН (●)

Таблица 1

Положение полюса Эйлера для моделей Евразии [3, 4]

№	Модель	Широта в градусах	Долгота в градусах	Скорость вращения град./млн. лет
1	SH-2008	54.2	259.3	0.251
2	ANI-2010	53.1	259.5	0.244

Исследование скоростей смещения Горного Алтая проводилось с учётом эффектов, связанных с Чуйским землетрясением 27.09.2003, $M = 7.3$. Пункты, расположенные в эпицентральной зоне (на расстоянии до 100 км от эпицентра), исключены из анализа (рисунок). Здесь зарегистрированы косейсмические смещения (от 1 метра на разрыве до 20 мм на расстоянии 80 км, 2003-2004 гг.), далее здесь продолжается постсейсмический процесс (1-3 мм/год) [3]. Исключение влияния сейсмического процесса проводилось исключением из анализа пунктов подверженных искажению. В анализе использованы пункты, расположенные на расстояниях более 100 км в дальней зоне землетрясения (рисунок, табл. 2). Для этих пунктов рассчитаны горизонтальные скорости относительно

Евразийской плиты (табл. 1). Аномальные скорости смещений получаются вычитанием из данных эксперимента модельных скоростей. Разброс теоретических плитных смещений для пунктов Горного Алтая достигает 0.3 мм, разность значений по двум моделям составляет 0.5 мм. Отражаются ли в скоростях современных смещений геологическая структура региона? Этот вопрос можно прояснить, рассмотрев разность скоростей относительно базовой точки внутри сети, например, Усть-Кан (USTK). Как видим из табл. 3, смещение точек относительно друг друга лежит в пределах ошибок наблюдений. Т.е. для десятилетнего периода наблюдений можем рассматривать смещение западной части Горного Алтая как единого блока.

Таблица 2

Скорости смещения пунктов Алтайской сети по моделям SH-2008 и ANI-2010 года, экспериментальные данные и разность эксперимент-модель, средняя величина вектора для западной части Горного Алтая 1.28 мм в год азимут смещения -33.5° N на ССЗ (эпоха 2001-2012 гг.)

Код пункта	Модель SH-2008 N / E мм/год	Модель ANI-2010 N / E мм/год	Период в годах	Экспериментальные данные с ошибкой N / E мм/год	Разность SH-2008		Разность ANI-2010	
					N	E	N	E
ANUI	-1.553 26.647	-1.496 26.097	2001- 2009	-1.02±0.29 +26.28±0.26	+0.533 -0.367	+0.476 +0.183		
SOLO	-1.454 26.744	-1.397 26.186	2001- 2009	-0.38±0.29 +25.85±0.26	+1.074 -0.891	+1.017 -0.336		
SEMI	-1.796 26.808	-1.738 26.241	2001- 2012	-0.97±0.18 +25.95±0.16	+0.826 -0.858	+0.768 -0.291		
CHIK	-1.989 26.837	-1.933 26.267	2001- 2012	-1.09±0.20 +25.42±0.17	+0.899 -1.417	+0.843 -0.847		
USTK	-1.553 26.837	-1.496 26.269	2001- 2012	-0.78±0.11 +26.34±0.11	+0.773 -0.497	+0.716 +0.071		
UST2	-1.553 26.837	-1.495 26.269	2005- 2012	+0.48±0.11 +26.27±0.11	+2.033 -0.567	+1.975 + 0.001		
KAIT	-1.743 26.921	-1.686 26.344	2001- 2012	-0.34±0.18 +25.32±0.18	+1.403 -1.601	+1.346 -1.024		
KAYT	-1.750 26.920	-1.693 26.343	2001- 2012	-0.43±0.17 +25.17±0.16	+1.320 -1.750	+1.263 -1.173		
			Среднее		+1.10 (N) -0.99 (E)	+1.05 (N) -0.43 (E)		
Среднее по двум моделям					+ 1.07 (N) -0.71 (E)			

Скорости относительных смещений (относительно пункта Усть-Кан - USTK)
для дальней зоны Чуйского землетрясения (2004-2010 гг.)

Код пункта	Широта φ	Долгота λ	Скорость V_{φ}	Скорость V_{λ}
КАУТ	50.145	85.465	-0.40 ± 0.39	-0.07 ± 0.34
КАИТ	50.146	85.439	-0.21 ± 0.29	0.11 ± 0.27
СНИК	50.644	86.313	-0.20 ± 0.29	0.44 ± 0.27
USTK	50.939	84.769	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
UST2	50.939	84.768	0.14 ± 0.21	-0.58 ± 0.18
SEMI	51.014	85.626	-0.60 ± 0.32	-0.03 ± 0.28
SOLO	51.700	84.419	-0.74 ± 0.41	-0.36 ± 0.37
АНУИ	52.357	84.768	0.41 ± 0.36	-0.29 ± 0.32
Среднее			-0.22	-0.11

Из анализа результатов для пунктов Алтайской сети, расположенных вне зоны влияния Чуйского землетрясения, получены значения скоростей горизонтальных движений относительно Евразии (табл. 2). Величина осредненного значения горизонтального вектора достигает 1.2 мм в год в направлении на ССЗ (период 2000 - 2011 гг.). Ошибка определения составляет 0.3-0.4 мм в год.

Скорости горизонтальных смещений для западной части Саянского региона получены GPS методом для эпохи 2000-2011 гг. Наши данные существенно дополнены результатами ИЗК СОРАН [4]. Горизонтальные скорости для эпохи 2000-2011 гг. приведены в таблице 4. Решение показано относительно Евразийской плиты. Для пункта Черёмушки (CHER), расположенного в посёлке на крутом склоне, значительное смещение на восток может быть связано со склоновым сползанием. В среднем по Западно-Саянскому региону и западной Туве для эпохи 2000-2011 гг. выделено смещение на СВВ с годовой скоростью 1.1 мм. Значение, полученные в итоге, могут быть искажены сейсмическими событиями с магнитудой больше 6: 27.09.2003 (Горный Алтай), 10.02.2011 (Западный Саян), 27.12.2011 и 26.02.2012 (восточная Тува). Ошибка определения смещения может быть оценена в 0.3÷0.6 мм.

Связь со структурными элементами региона, по нашему мнению, проявилась слабо, что вызвано малыми скоростями тектонических смещений на разломах и на границах блоков земной коры. Ошибка определения скоростей около 0.5 мм, видимо, может служить ограничением величины скоростей в год. В итоге, по GPS данным сделаны оценки тектонической составляющей современных смещений западной части Саянского региона (эпоха 2000-2011 гг.): 1.1 мм/год на СВВ и западной части Горного Алтая (эпоха 2001-2012 гг.): 1.2 мм/год на ССЗ.

Горизонтальные скорости Западно-Саянского региона и западной Тувы (с одной точкой Монголии) относительно Евразии, с запада на восток. Данные по пунктам CHAD, ULAA, ARAD, ERZN определены для эпохи 2000-2009 гг. [4], данные по пунктам RONA, MISH, CHER определены для эпохи 2003-2011 гг. Суммарный вектор скорости от 1.1 мм/год до 1.5 мм/год, азимут от 60°N до 67°N, на СВВ

Код пункта	Широта φ	Долгота λ	Скорость V_{φ}	Скорость V_{λ}
RONA	52.160	89.861	0.10±0.54	1.09±0.58
MISH	52.443	90.033	0.53±0.34	0.95±0.34
CHAD	51.334	91.198	-0.18±0.32	1.16±0.65
CHER*	52.857	91.416	0.52±0.30	4.06±0.32
ULAA	49.971	92.078	1.45±0.39	2.53±0.81
ARAD	52.443	93.570	-0.28±0.30	0.27±0.49
ERZN	50.250	95.023	1.04±0.57	0.25±0.89
Среднее			+0.45±0.24	+1.47±0.52
Среднее без *			+0.44	+1.04

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колмогоров В.Г., Колмогорова П.П. Современные вертикальные движения Алтае-Саянской области и их связь с новейшими движениями и сейсмичностью // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 6. – С. 567-578.
2. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // ДАН. – 2005. – Т. 405, № 6. – С. 804–809.
3. Поля смещений Алтае-Саянского региона и эффективные реологические параметры земной коры / В.Ю. Тимофеев, Д.Г. Ардюков, А.В. Тимофеев и др. // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 3. – С. 481–497.
4. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным измерений / А.В. Лухнев, В.А. Саньков, А.И. Мирошниченко, С.В. Ашурков, Э.Кале // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 7. – С. 1006-1017.
5. Continental Deformation in Asia from a Combined GPS Solution / E. Calais, L. Dong, M. Wang, Z. Shen, M. Vergnolle // Geophysical Research Letters. – 2007. – Vol14. – doi: 10.1029/2006 GL028433.
6. Jin Sh., Park P.H., Zhu W. Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations // Earth and Planetary Science Letters. – 2007. – V. 257. – P. 486-496.

© А. В. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, Е. В. Бойко, В. Ю. Тимофеев, Е. И. Грибанова, 2017