

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ GPS ИЗМЕРЕНИЙ (2003–2006 гг.) НА ДАЛЬНОМ ВОСТОКЕ ПО СИХОТЭ-АЛИНСКОЙ СЕТИ

В.Ю. Тимофеев¹, П.Ю. Горнов², Д.Г. Ардюков¹, Ю.Ф. Малышев², Е.В. Бойко¹

¹*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск*

²*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск*

Поступила в редакцию 12 октября 2007 г.

В работе представлены результаты геодинамических исследований с использованием GPS метода на территории Дальнего Востока. Измерения с помощью GPS приемников TRIMBLE-4700 начаты на Сихотэ-Алинском профиле в 2003 году. Рассмотрены технология проведения GPS измерений, вопросы выбора пунктов измерений и конфигурации сети в связи со структурой региона. Результаты анализа GPS данных (2003–2006 гг.) использованы для изучения разломной сети континентальной окраины Дальнего Востока. Проанализированы различные модели вращения Евразии: от известной модели NNR-NUVEL-1A до современных. Предложена модель AR-IR-2006 твердотельного вращения Евразии с параметрами полюса вращения по широте 51.045°N , 255.842° по долготе при скорости вращения 0.2423° в млн лет. Представлены предварительные оценки параметров вращения Амурской плиты ($57.6^{\circ}\pm 0.5^{\circ}\text{N}$, $117.1^{\circ}\pm 0.5^{\circ}\text{E}$ и $0.083^{\circ}\pm 0.004^{\circ}$ в млн лет) с использованием результатов по Сихотэ-Алинской и Забайкальской сетям.

Ключевые слова: GPS технология, современные движения земной коры, модели вращения Евразии, Амурская плита, Сихотэ-Алинь.

ВВЕДЕНИЕ

Современные геодинамические исследования восточной части Азии связаны с развитием GPS технологии, используемой для определения кинематических характеристик различных тектонических зон. Выделение внутриплитных смещений требует уточнения моделей твердотельного вращения Евразии для выделения аномальных смещений [11, 15, 16]. Система постоянных и временных станций на территории Азии для измерений с использованием различных модификаций методов космической геодезии развивается с девяностых годов прошлого века. В настоящее время сети станций развиты на территории Японии, Кореи, Китая, Монголии, Индии, Киргизии и Казахстана. Для определения положения на основной части станций используется наиболее мобильная GPS технология, а также методы VLBI, DORIS и SLR на стационарных станциях [12, 14]. В восточной части России сетевые наблюдения еще недостаточно плотны: очень редкая сеть, как постоянных станций, так и сетевых измерений [7]. Исследования современных движений по Сихотэ-Алинскому

профилю (север Приморского края, юг Хабаровского края) позволяет дополнить существующие сети космической геодезии.

Целью работы являлось получение поля скоростей современных движений земной коры, что позволяет рассматривать модели явлений, отражающие распределение смещений и деформаций на границах блоков земной коры (в зоне крупных разломов), эффекты, связанные с сильными землетрясениями региона, получать кинематические характеристики смещений отдельных тектонических блоков земной коры.

КОНФИГУРАЦИЯ СЕТИ И ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ РЕГИОНА

Для тектоники восточной части Азии важны два события: субдукция под Евразию океанических плит, а также вытеснение на восток относительно небольших плит, что связано с коллизией Индийской и Евразийской плит [25]. Существование одной из таких плит, Амурской (АМ), обсуждается рядом авторов. По предположению одних авторов [24, 26, 27], она охватывает юго-восточную части России, северо-

восточную часть Китая, Корейский полуостров и Японское море. По мнению других [5], ее южная и восточная граница проходит западнее по системе разломов Тан Лу. Результаты исследований по Сихотэ-Алинскому профилю позволяют получить дополнительную информацию для решения этого дискуссионного вопроса.

Сихотэ-Алинская геодинамическая сеть была заложена в августе 2003 г., а первый цикл измерений проведен в начале октября 2003 г. силами Института геофизики СО РАН и Института тектоники и геофизики ДВО РАН. На конец 2004 г. сеть насчитывала 6 пунктов. Широтный профиль пересекает систему Сихотэ-Алиния, при этом базовая станция ZMEY расположена в 300 км к северу от профиля, в 60 км к ЮВВ от г. Хабаровска. Сеть простирается от 45° до 48° широты и от 134° до 136° долготы [10]. Сихотэ-Алинский профиль (рис. 1) пересекает крупные разломы [3] и границу двух крупных тектонических элементов – Центрально-Азиатского тектонического пояса и Тихоокеанского тектонического пояса. Граница между ними в пределах нашего профиля проходит по Арсеньевскому разлому. В более детальном тектоническом плане пункты наблюдений расположены следующим образом. Пункт № 1 (MAL2) находится в пределах Матвеевского выступа фундамента докембрийского Ханкайского массива (микроконтинента), пункт № 2 (EAST) – среди образований Сихотэ-Алинского позднемезозойского орогенного пояса в пределах Самарко-Ванданской зоны. Далее в пределах этого же орогенного пояса в Лужкинской зоне расположен пункт № 3 (BURS). Между этими двумя пунктами проходит Центральный Сихотэ-Алинский разлом. Следующие два пункта наблюдений – № 4 (NEBO) и № 5 (PLST) находятся в пределах Восточно-Сихотэ-Алинского позднемезозойского–палеогенового вулканического пояса.

Технология проведения GPS измерений была отработана при проведении подобных исследований на территории Алтае-Саянской области [1, 8, 9]. Фактором, осложняющим проведение измерений, является отсутствие надежной постоянной станции системы IGS в пределах нескольких сотен километров от пунктов сети [18–22]. Имеющаяся IGS станция КНАЖ в Хабаровске, имеет высокий уровень помех, работает с перерывами во времени и дает противоречивые результаты анализа (рис. 2). Известно, что точность полученных результатов при использовании геодезических двухчастотных приемников TRIMBLE 4700 при одновременном многосуточном сетевом опросе и последующей обработке может достигать

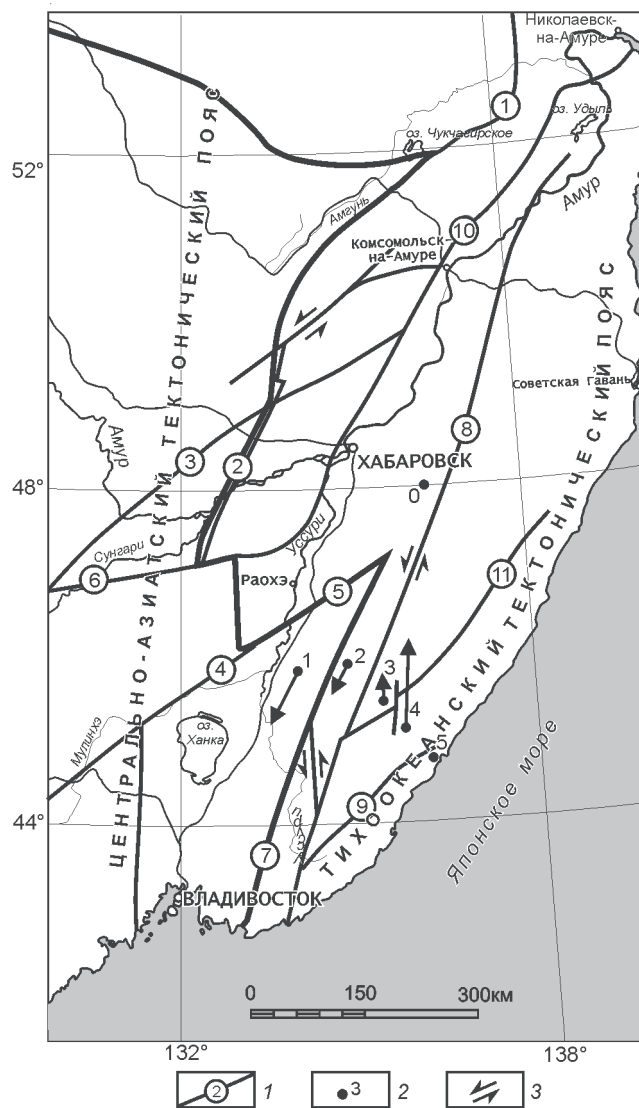


Рис. 1. Положение пунктов Сихотэ-Алинского профиля GPS измерений на Дальнем Востоке и главные тектонические подразделения региона.

На схеме обозначены: (1) – основные разломы региона (по Л. П. Карсакову и др., 2005) с упрощениями: 1 – Пауканский, 2 – Куканский, 3 – Илань-Итунский, 4 – Дунми, 5 – Алчанский, 6 – Наолихэ, 7 – Арсеньевский, 8 – Центрально-Сихотэ-Алинский, 9 – Прибрежный, 10 – Амурский, 11 – Колумбинский; (2) – пункты GPS измерений: 0 – ZMEY (с 2003 г.), 1 – MAL2 (с 2003 г.), 2 – EAST (с 2003 г.), 3 – BURS (с 2003 г.), 4 – NEBO (с 2003 г.), 5 – PLAS (с 2004 г.). Пункт ZMEY (к ЮВ от г. Хабаровска) при сетевых измерениях работал в режиме опорной станции; (3) – направления смещений на разломах. Масштаб смещения пунктов наблюдений относительно базового пункта (0) в 1 см – 5 мм.

миллиметров и долей миллиметра. При измерениях использовались два приемника TRIMBLE 4700 с антеннами типа Microcenter. Металлические марки для установки антенны на пунктах были забетонированы

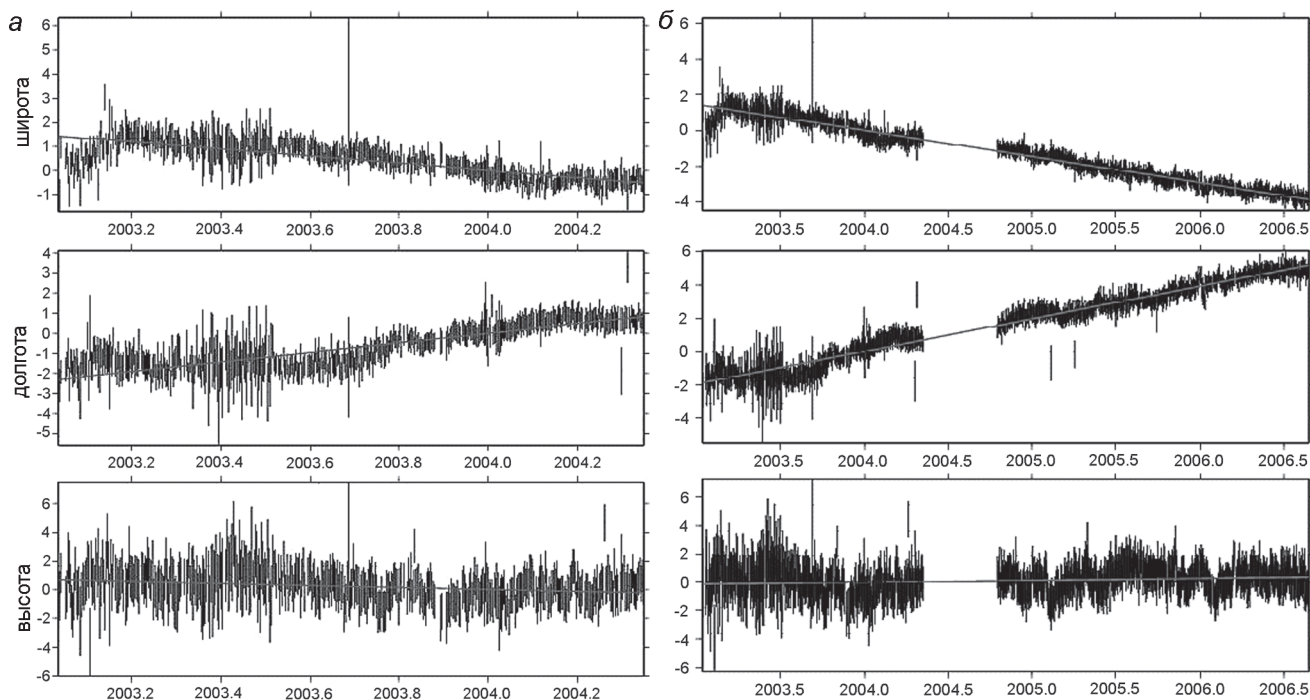


Рис. 2. Скорости смещений в геоцентрической системе координат ITRF2000, решение IGS для постоянной станции КНАЖ (Хабаровск) по периодам.

а – с начала 2003 года до лета 2004 года, сверху вниз: широтное (-14.99 ± 0.55 мм/год), долготное ($+23.99 \pm 0.76$ мм/год) и вертикальное (-6.94 ± 1.8 мм/год) смещение пункта в см. *б* – с начала 2003 г. до осени 2006 г., сверху вниз: широтное (-14.59 ± 0.11 мм/год), долготное ($+19.62 \pm 0.15$ мм/год) и вертикальное ($+1.46 \pm 0.36$ мм/год) смещение пункта в см.

в скальные выходы горных пород. Базовая станция имеет метку на бетонном постаменте площадью 0.8×0.6 м², глубиной 2.7 метра, заложенном в осадочных породах. Станция расположена на восточном борту Переясловского грабена в малонаселенной деревне Змейка, имеет низкий уровень помех. Как и при проведении измерений на юге Сибири, использовалась технология жесткой центровки антенн. Один комплект аппаратуры работал в режиме постоянной станции (пункт ZMEY), второй комплект использовался для временных измерений на пунктах Сихотэ-Алинского профиля. Периоды измерений на отдельных сетевых пунктах составляли 2–3 суток, измерения проводились ежегодно в осеннее время (третья декада сентября – первая декада октября). Высоты пунктов измерений составляют от десятков метров в равнинной части сети до нескольких сотен метров в горной части исследуемой территории. К факторам, осложняющим проведение измерений, следует отнести высокую залесенность территории, что затрудняет прием сигнала со спутников и увеличивает ошибку измерений. Из пунктов сети только станция ZMEY и

пункт PLST открыты для приема сигнала со всех направлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА GPS ДАННЫХ ПО СИХОТЭ-АЛИНСКОЙ СЕТИ

Обработка результатов измерений по сети проводилась с использованием специальных программ относительно постоянных станций Евразии и ее восточного окружения. Высокая точность достигалась после учета различных поправок (приливных, за движение полюса и спутниковых) в процессе постобработки данных. Далее получали 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 минимально деформируется. Результаты по четырем циклам измерений на Сихотэ-Алинской сети (2003–2006 гг.) обрабаты-

Таблица 1. 3D смещения пунктов Сихотэ-Алинской сети относительно постоянной IGS станции YSSK (Южно-Сахалинск) в миллиметрах с ошибкой, “+” смещение на север, восток и вверх.

Код пункта и период измерений	Широта	Долгота	Высота в метрах	Скорость широтная	Скорость долг.	Скорость вертикал.
YSSK (2003-2006)	46.83	142.72	91	+0.00±0.00	+0.00±0.00	+0.00±0.00
ZMEY (2003-2006)	48.10	135.59	129	+0.08±0.37	+7.71±0.47	+2.58±1.62
MAL2 (2003-2006)	45.81	134.08	189	+0.86±1.00	+10.86±1.10	+4.45±5.02
EAST (2003-2006)	46.00	135.06	404	-0.12±1.16	+8.73±1.12	+4.54±6.46
BURS (2003-2006)	45.40	135.44	687	+0.56±1.15	+9.62±1.44	-7.38±6.99
NEBO (2003-2006)	45.11	135.82	838	+1.97±1.27	+9.39±1.47	+6.47±6.56
PLST (2004-2006)	44.73	136.31	112	+2.57±1.13	+12.36±1.30	+1.26±5.05

лись с использованием данных по мировой сети постоянных станций Евразии и ее окружения (YAKT, BILI, PETR, MAGO, YSSR, MIZV, KSMV, TSKB, USUD, TIXI, DAEJ, SUWN, TWTF, PIMO, TCMS, TNML, NVSK, BJFS, WUHN, IRKT, KUNM, LHAS, NRIL, URUM, HYDE, HISC, BAN2, SELE, POL2, KIT3, ARTU, BANR, ZWE2, MOBN, ELAT, MERS, ANKR, GLSV) с помощью программ GAMIT-GLOBK. Отдельно рассматривались решения относительно постоянных станций мировой сети YSSK (Южно-Сахалинск), YAKT (Якутск), IRKT (Иркутск), SUWN и DAEJ (Корея). В таблице 1 и на рисунке 3а показаны результаты счета относительно станции YSSK. Из рисунка следует, что станции континентальной окраины Азии от Кореи до юга Хабаровского края смещаются на восток, относительно Южно-Сахалинска. Станции восточной окраины Азии, центральной Японии и острова Сахалин расположены на разных тектонических блоках (плитах). Отметим, что эпоха 2003–2006 гг. позволяет рассматривать полученные смещения как предшествующие сильному землетрясению ($M = 6.5-7.0$) 2 августа 2007 г. в Татарском проливе около г. Невельск. Зарегистрированное сжатие по линии восток-запад соответствует сейсмологическим определениям механизма очага (сжатие восток-запад). Измерения на краю континента постоянно находятся под влиянием сейсмической активности тихоокеанской зоны. Так, на рис. 3б показано 3D смещение пункта Южно-Сахалинск в момент землетрясения $M = 8.2$ к востоку от о. Хоккайдо 25 сентября 2003 года (в 600 км к югу от пункта YSSK).

Рассматривая смещение пунктов Сихотэ-Алинской сети относительно континентальных станций Кореи (в 1500 км к ЮЮЗ) и станции Якутск (в 1500 км к ССЗ), следует отметить различный характер смещений (рис. 4а и 4б). Так, картина относительно станции Якутск показывает внутриплитное смещение пунктов сети на восток. Смещения пунктов сети в геоцентрической системе и оценка аномальных остатков (после снятия

твердоплитного вращения Евразии по различным моделям) рассматриваются далее в разделе, посвященном Амурской плите.

Результаты анализа относительно базовой станции Сихотэ-Алинской сети ZMEY и пункта профиля BURS приведены в таблице 2 и на рис. 4в и 4г. Ошибка при определении значений горизонтальных скоростей составляет $0.4 \div 1.5$ мм, для вертикальных скоростей – от 1.6 до 7.0 мм (табл. 1 и 2). Отметим, что открытость пункта PLST для приема сигнала со всех направлений позволила на этом пункте за более короткий период наблюдений получить результат с ошибкой, типичной для других пунктов сети (табл. 1 и 2). Расчеты относительно пункта ZMEY показывают смещение прибрежных пунктов на север (левостороннее смещение по Центральному Сихотэ-Алинскому разлому). В этом случае западная группа станций (ZMEY, MAL2, EAST) имеет средние скорости $+0.2 \pm 1.2$ мм (на север) и $+1.2 \pm 1.1$ мм (на восток), а для восточных прибрежных станций (BURS, NEBO, PLST) соответственно: $+1.7 \pm 1.2$ мм (на север) и $+3.3 \pm 1.5$ мм (на восток). Вертикальные движения по группам станций оказались разного знака, зарегистрировано слабое поднятие западных станций и опускание восточных.

МОДЕЛИ ВРАЩЕНИЯ ЕВРАЗИИ

Внутриплитные смещения как в зонах сильных землетрясений, так и для отдельных тектонических плит разумнее изучать, имея максимально точную модель смещения глобальной плиты (в нашем случае Евразии). Из известных моделей вращения Евразии можно отметить геолого-геофизическую модель NNR-Nuvel-1a, модель APKIM2000 [12], построенную по экспериментальным данным всех постоянных станций Евразии на эпоху 2000 года. Неприятной особенностью последней модели является то, что при анализе использованы данные по станциям, расположенным на платформах севера континента, а также данные по станциям центральной и южной части, где протекает активный тектонический процесс,

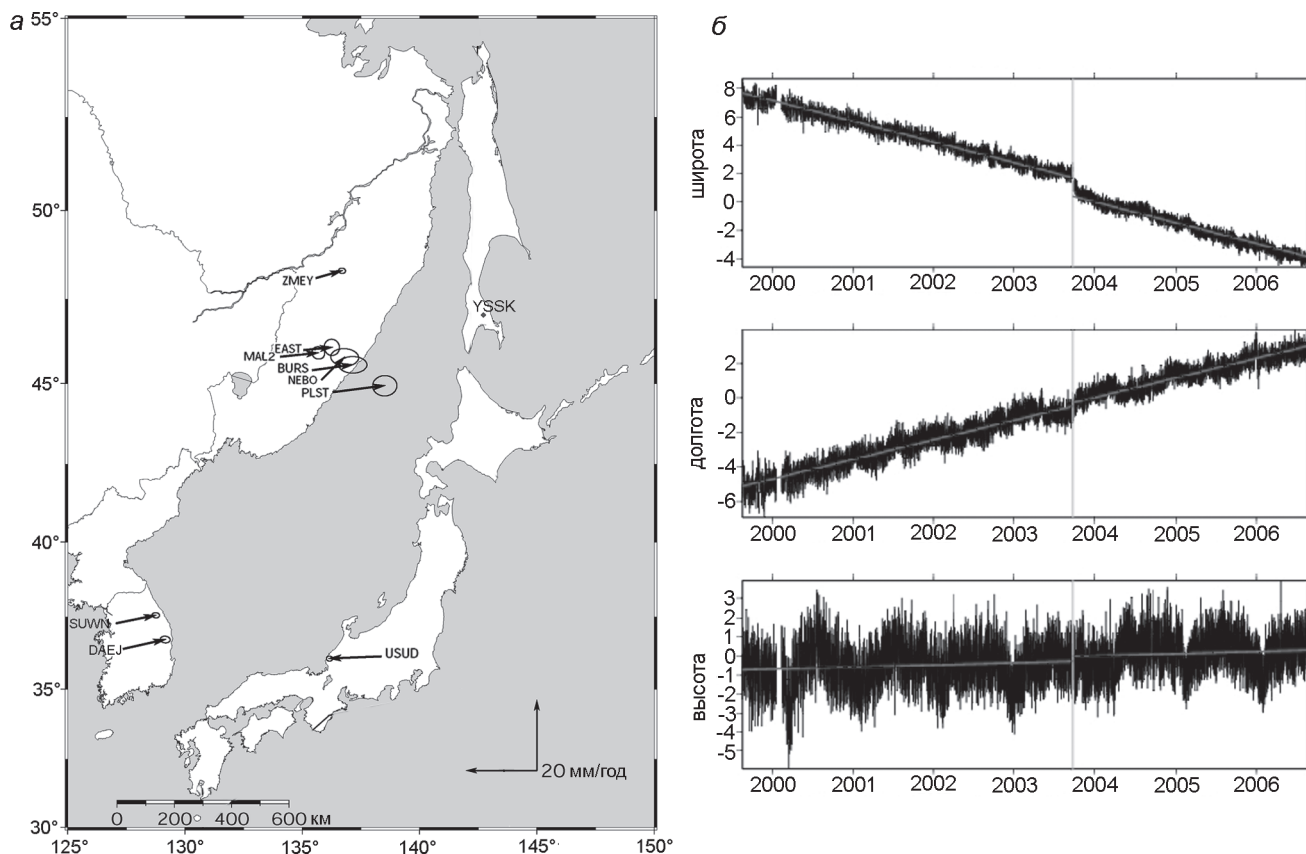


Рис. 3. Горизонтальные смещение пунктов относительно постоянного пункта Южно-Сахалинск (YSSK) за период 2003–2005 гг. (а).

Скорости смещений в геоцентрической системе координат ITRF2000, решение IGS для постоянной станции YSSK (Южно-Сахалинск) с 1999 по 2006 гг. (б)

Сверху вниз: широтное ($-14,64 \pm 0,07$ мм/год), долготное ($+11,3 \pm 0,09$ мм/год) и вертикальное ($+1,11 \pm 0,22$ мм/год) смещение пункта. Показаны линии линейной регрессии. Вертикальной линией показано смещение пункта в момент землетрясения 25 сентября 2003 года.

отражающийся в современных катастрофических землетрясениях. Учитывая это при анализе данных по югу Сибири и Дальнего Востока, нам пришлось внимательно рассмотреть модельные оценки и экспериментальные данные по постоянным станциям севера Азии (рис. 5). При этом мы старались не опираться на данные станций, расположенных в зоне вечной мерзлоты.

Фактически, рассматривались экспериментальные результаты мировой сети IGS для станций ARTU (Средний Урал), NVSK (Новосибирск), KSTU (Красноярск) и IRKT (Иркутск). Рассматривались значения горизонтальных скоростей за год в геоцентрической системе координат (относительно центра Земли). Станции расположены в полосе широт ($52^\circ \div 56^\circ$ северной широты) от Урала до Байкала (от 58° до 104° восточной долготы) в тектонически стабильной части Евразийской плиты. Данные по этим станциям

показали систематические отклонения (в 2 мм) от оценок по модели NNR-Nuvel-1a и модели APKIM2000 (таблицы 3–5). Как известно, для определения скоростей горизонтальных смещений отдельного пункта с координатами φ и λ используются следующие соотношения:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \omega \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(\lambda - \Lambda) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = \omega \cdot [\sin(\Phi) - \cos(\lambda - \Lambda) \cdot \tan(\varphi) \cdot \cos(\Phi)] \quad (2)$$

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

Отметим, что скорости для горизонтальных смещений по группе станций от Урала до Байкала (ARTU, NVSK, KSTU, IRKT) на эпоху 2004 и 2006 годов различаются на 0.1 мм (табл. 4–5).

Анализ результатов счета на эпоху 2004 и 2006 годов для IGS станции KHAJ (Хабаровск) показывает, что в этом случае расхождение достигает 4.4 мм. Рассматривая смещение станции KHAJ (геоцентри-

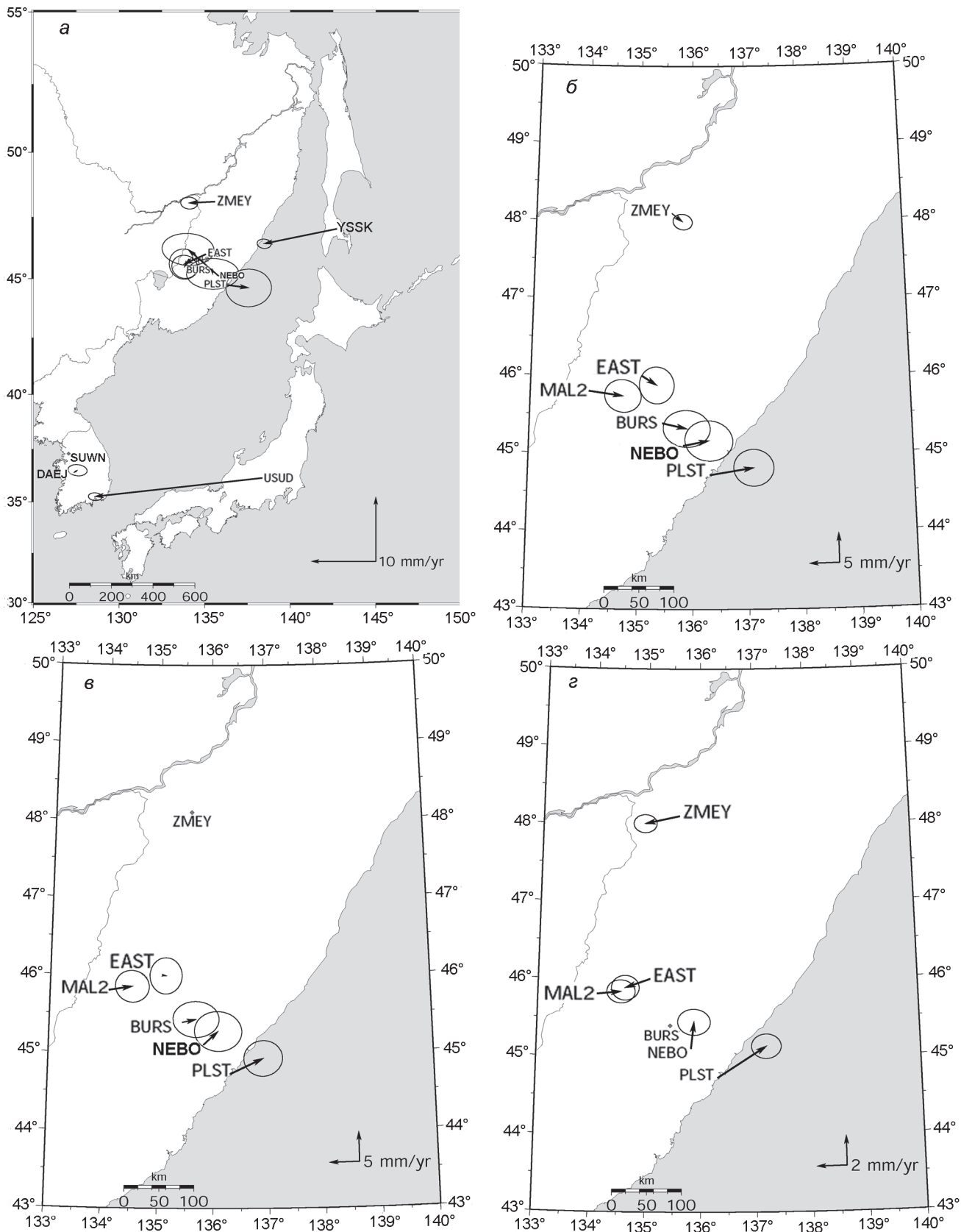


Рис. 4. Горизонтальные смещение пунктов относительно постоянной станции SUWN (Корея) за период 2003–2005 гг. (а), относительно постоянной станции YAKT (Якутск) за период 2003–2006 гг. (б), относительно базовой станции ZMEY за период 2003–2006 гг. (в), относительно сетевой станции BURS за период 2003–2006 гг. (з).

Таблица 2. 3D смещения пунктов Сихотэ-Алинской сети относительно временной базовой станции ZMEY в мм с ошибкой, “+” смещение на север, восток и вверх. Приведены результаты по группе западных и восточных станций сети.

Код пункта и период измерений	Широта	Долгота	Высота в метрах	Скорость широтная	Скорость долг.	Скорость верт.
ZMEY (2003-2006)	48.10	135.59	129	+0.00±0.00	+0.00±0.00	+0.00±0.00
MAL2 (2003-2006)	45.81	134.08	189	+0.64±1.06	+3.80±1.13	+2.26±5.25
EAST (2003-2006)	46.00	135.06	404	-0.09±1.21	+0.60±1.07	+1.46±6.63
Среднее по 3-м западным станциям				+0.2±1.2	+1.2±1.1	≥+ 1
BURS (2003-2006)	45.40	135.44	687	+0.47±1.20	+2.21±1.54	-8.85±7.17
NEBO (2003-2006)	45.11	135.82	838	+2.20±1.33	+2.40±1.58	+5.24±6.78
PLST (2004-2006)	44.73	136.31	112	+2.51±1.19	+5.39±1.29	-0.63±5.39
Среднее по 3-м восточным станциям				+1.7±1.2	+3.3±1.5	≤ - 1

Таблица 3. Годовые скорости смещений постоянных станций Азии на средних широтах (от Урала до Сахалина) в мм по моделям NNR-Nuvel-1a, APKIM2000 для Евразийской плиты и экспериментальные данные в геоцентрической системе координат с ошибкой наблюдений (решение IGS на 2004 г. и на 2006 г.). Горизонтальные смещения: “+” на север, на восток; “-” на юг, на запад.

Пункт	φ	λ	NNR-Nuvel-1a (N)	NNR-Nuvel-1a (E)	APKIM 2000 (N)	APKIM 2000 (E)	IGS 2004 (N)	IGS 2004 (E)	IGS 2006 (N)	IGS 2006 (E)
ARTI	56.43	58.56	+2.6	24.7	+6.3	25.1	+5.3±0.2	+25.2±0.3	+5.10±0.04	+24.50±0.05
NVSK	54.84	83.24	-4.4	24.6	-0.1	26.5	-2.4±0.1	+24.9±0.2	-2.27±0.06	+25.72±0.09
KSTU	56.00	92.79	-7.0	23.6	-2.6	26.1	-4.3±0.1	+24.5±0.2	-4.75±0.05	+24.20±0.07
IRKT	52.22	104.32	-9.8	22.8	-5.6	26.2	-8.3±0.1	+24.8±0.1	-8.18±0.02	+24.39±0.03
KHAJ	48.32	135.03	-15.2	18.1	-12.1	23.2	-15.0±0.6	+24.0±0.8	-14.59±0.11	+19.62±0.15
YSSK	46.83	142.72	-15.9	16.8	-13.2	22.2	-13.8±0.6	+12.1±0.2	-14.64±0.07	+11.30±0.09

Таблица 4. Относительные смещения постоянных GPS станций. Разность экспериментальных данных в геоцентрической системе координат (решение IGS на 2004 г.) и вычислений по моделям NNR-Nuvel-1a и APKIM-2000 для Евразийской плиты в мм. Код тектонической плиты, к которой относится станции: NA – Северо-Американская плита, ОК – Охотоморская плита, ЕИ – Евразийская плита, АМ – Амурская плита.

Пункт	φ	λ	Эксп.д.- NNR-Nuvel-1a(шир.)	Эксп.д.- NNR-Nuvel-1a (долг.)	Эксп.д.-APKIM 2000 (шир.)	Эксп.д.-APKIM 2000 (долг.)	Плита
ARTI	56,43	58,56	+2.7±0.2	+0.5±0.3	-1.0 ±0.2	+0.1±0.3	EU
NVSK	54,84	83,24	+2.0±0.1	+0.3±0.2	-2.3±0.1	-1.6±0.2	EU
KSTU	56,00	92,79	+2.7±0.1	+0.9±0.2	-1.7±0.1	-1.6±0.2	EU
IRKT	52,22	104,32	+1.5±0.1	+2.0±0.1	-2.7±0.1	-1.4±0.1	EU
Среднее	:	:	+2.2	+0.9	-1.9	-1.1	
KHAJ	48,32	135,03	+0.2±0.6	+5.9±0.8	-2.9±0.6	+0.8±0.9	EU ? AM ?
YSSK	46,83	142,72	+2.1±0.6	-4.7±0.2	-0.6±0.6	-10.1±0.2	NA (OK)

ческое решение IGS на 2006 г.) относительно станции YSSK (геоцентрическое решение IGS на 2006 г.), получаем для широтной компоненты (на север) $+0.05±0.37$ мм, для долготной (на восток) $+8.32 ± 0.24$ мм и для вертикальной $+0.36 ± 0.58$ мм. Эти значения в пределах ошибок очень близки к решению для станции ZMEY Сихотэ-Алинской сети относительно YSSK (табл. 1), соответственно: $+0.08 ± 0.37$ мм, $+7.71 ± 0.47$ мм и $+2.58 ± 1.62$ мм. К сожалению,

нестабильность работы станции KHAJ (отсутствие данные на период сетевых измерений) не позволила сделать совместную обработку данных.

Используя известные формулы (1, 2) для определения скоростей горизонтальных смещений отдельного пункта с координатами φ и λ через модельные параметры, координаты полюса и скорости вращения тектонической плиты (Φ, Λ, ω), составив систему уравнений, можно получить параметры полюса вращения.

Таблица 5. Относительные смещения постоянных GPS станций. Разность экспериментальных данных в геоцентрической системе координат (решение IGS на 2006 г.) и вычислений по моделям NNR-Nuvel-1a и APKIM-2000 для Евразийской плиты.

Пункт	Широта	Долгота	Эксп.д.- NNR-Nuvel-1a (шир.)	Эксп.д.- NNR-Nuvel-1a (долг.)	Эксп.д.-APKIM 2000 (шир.)	Эксп.д.-APKIM 2000 (долг.)	Плита
ARTI	56.43	58.56	+2.50±0.04	+0.15±0.05	-1.20±0.04	-0.25±0.05	EU
NVSK	54.84	83.24	+2.13±0.06	+1.12±0.09	-2.17±0.06	-0.78±0.09	EU
KSTU	56.00	92.79	+2.25±0.05	+0.60±0.07	-2.15±0.05	-1.90±0.07	EU
IRKT	52.22	104.32	+1.62±0.02	+1.59±0.03	-2.58±0.02	-1.81±0.03	EU
Среднее	:	:	+2.1	+0.9	-2.0	-1.2	
YAKT	62.03	129.68	+1.18±0.06	+3.36±0.08	-2.32±0.06	-1.04±0.08	EU
Среднее по 5 станциям			+1.94	+1.36	-2.08	-1.16	
KHAJ	48.32	135.03	+0.61±0.11	+1.52±0.15	-2.49±0.11	-3.58±0.15	EU ? AM ?
SUWN	37.28	127.05	+0.48±0.03	+4.52±0.05	-3.12±0.03	-0.38±0.05	EU ? AM ?
DAEJ	36.40	127.37	+0.12±0.04	+4.15±0.07	-3.38±0.04	-0.85±0.07	EU ? AM ?
USUD	36.13	138.36	-1.56±0.09	+50.20±0.13	-4.56±0.09	+55.60±0.13	PH
YSSK	46.83	142.72	+1.26±0.07	-5.50±0.09	-2.44±0.07	-10.9±0.09	NA (OK)

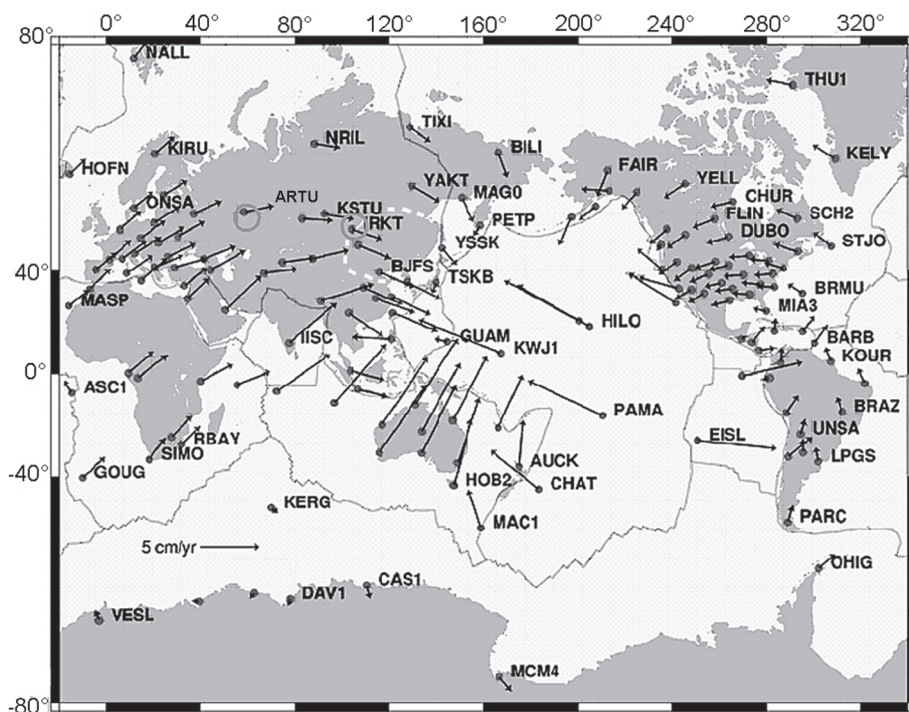


Рис. 5. Горизонтальные смещения в геоцентрической системе координат постоянных пунктов мировой сети IGS (международная геодинамическая система,

<http://sidesshow.jpl.nasa.gov/mbh/series/html>.

Показаны границы тектонических плит (сплошные линии), включая Амурскую (пунктир). Выделены постоянные пункты ARTU и IRKT.

Таблица 6. 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.

	Параметры полюса вращения		
	Широта, градусы	Долгота, градусы	Скорость, градус/млн лет
Модель NNR-Nuvel-1a	50.631°N	247.725°E	0.2337
Модель APKIM-2000	57.9°N	262.9°E	0.2587
Модель AR-IR-2006	51.045°N	255.842°E	0.2423

Опираясь на экспериментальные результаты перечисленных выше четырех континентальных станций юга Сибири (ARTU, NVSK, KSTU, IRKT) и соотношения (1), была построена модель AR-IR-2006 (табл. 6), относительно которой вычислялись аномальные смещения Сихотэ-Алинской сети.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ АМУРСКОЙ ПЛИТЫ

При изучении кинематики Амурской плиты и определении положения полюса и скорости вращения будем использовать геоцентрическое решение для 6 станций Сихотэ-Алинской сети (восточная часть плиты) и известное решение для Забайкальс-

Таблица 7. Горизонтальные смещения станций Сихотэ-Алинской сети: по экспериментальным данным (решение в геоцентрической системе координат по программе GAMIT-GLOBK), по модельным расчётам (модели NNR-Nuvel-1a и APKIM2000), разностные смещения (эксперимент – модель). Средние разности по группе станций (эксперимент – модель NNR-Nuvel-1a) +2.06 и +3.33, (эксперимент – модель APKIM2000) -2.23 и -1.85.

Код пункта	φ	λ	Эксп. рез. (φ), в мм	Эксп. рез. (λ), в мм	(φ)NNR-Nuvel-1a /разность = Экс.-М.	(λ)NNR-Nuvel-1a /разность = Экс.-М.	APKIM 2000 (φ) /разность = Экс.-М.	APKIM 2000 (λ) /разность = Экс.-М.
Zmey	48.10	135.59	-13.1	+21.7	-15.3 /+2.2	+18.0 /+3.7	-12.2 /-0.9	+23.2 /-1.5
MAL2	45.81	134.08	-13.5	+22.0	-15.1 /+1.6	+18.7 /+3.3	-11.9 /-1.6	+23.9 /-1.9
EAST	46.00	135.06	-15.6	+20.8	-15.2 /-0.4	+18.5 /+2.3	-12.1 /-3.5	+23.7 /-2.9
BURS	45.40	135.44	-14.0	+22.0	-15.3 /+1.3	+18.6 /+3.4	-12.1 /-1.9	+23.7 /-1.7
NEBO	45.11	135.82	-12.6	+21.2	-15.3 /+3.1	+18.5 /+2.7	-12.2 /-0.4	+23.7 /-2.5
PLST	44.73	136.31	-10.7	+23.1	-15.3 /+4.6	+18.5 /+4.6	-12.3 /+1.6	+23.7 /-0.6

Таблица 8. Горизонтальные смещения станций Сихотэ-Алинской сети: по экспериментальным данным (решение в геоцентрической системе координат по программе GAMIT-GLOBK), по модельным расчётам AR-IR-2006 модель, разностные смещения (эксперимент – модель).

Пункт	Широта (φ)	Долгота (λ)	Модель AR-IR-2006 (φ)	Модель AR-IR-2006 (λ)	Геоцентр1 (φ)	Геоцентр1 (λ)	Разность: Геоц.1-Модель (φ)	Разность: Геоц.1-Модель (λ)
Zmey	48.10	135.59	-14.63	+20.40	-13.1	+21.7	+1.53	+1.30
MAL2	45.81	134.08	-14.40	+21.06	-13.5	+22.0	+0.90	+0.94
EAST	46.00	135.06	-14.55	+20.85	-15.6	+20.8	-1.05	-0.05
BURS	45.40	135.44	-14.60	+20.87	-14.0	+22.0	+0.60	+1.13
NEBO	45.11	135.82	-14.66	+20.85	-12.6	+21.2	+2.06	+0.45
PLST	44.73	136.31	-14.73	+20.82	-10.7	+23.1	+4.03	+2.28
Среднее	45.86	135.38					+1.38±0.6	+1.01±0.3

кой сети (западная часть плиты) [4]. Аномальное смещение пунктов Сихотэ-Алинской сети (2003–2006 гг.) относительно моделей NNR-Nuvel-1a и APKIM2000 приведено в табл. 7. В результатах еще раз продемонстрировано несовершенство этих моделей (смещение на СВ и ЮЗ). С использованием модели AR-IR-2006 получается среднее значение станций сети: +1.38±0.62 мм (N), +1.01±0.31 мм (E), смещение на СВ (табл. 8). Для контроля построено второе геоцентрическое решение через относительное (через постоянные станции Кореи SUWN и DAEJ по решению IGS), используя модель AR-IR-2006, и получено среднее значение станций сети: 1.75±0.32 мм (N), +1.28±0.31 мм (E), т.е. также смещение на СВ.

Для западной части плиты в расчеты приняты результаты по 6 станциям (1997–2004 гг.), расположенным к юго-востоку от оз. Байкал (рис. 6). Иркутскими авторами [4] расчеты проводились относительно станции Иркутск, расположенной на Сибирской платформе (табл. 9). Обработка данных измерений в Приморье проводилась относительно модели AR-IR-2006 твердотельного вращения Евразии (параметры модели приведены в табл. 6). Два решения для Амурской плиты (первое – через геоцентрическое решение Сихотэ-Алинской сети и второе – относительно корейских станций) приведены на рис. 6. Учитывая дискуссионность восточной границы Амурской плиты, рассматривалось третье решение с

Таблица 9. Скорости горизонтальных смещений пунктов юго-восточной части Байкальской сети, включая пункт Улан-Батор; западная часть Амурской плиты. Скорости вычислены относительно пункта IRKT (1997–2004) по работе Лухнев и др., 2005.

Код пункта и период измерений	Широта	Долгота	Скорость широтная	Скорость долг.
TURK (1994-2002)	52.970	108.243	+0.18 ±0.18	+1.55 ±0.19
HORN (1999-2003)	52.121	109.153	-1.34 ±0.52	+1.15 ±0.72
ULAZ (1997-2004)	51.815	107.622	-1.47 ±0.05	+0.87 ±0.07
UDUN (1994-2003)	51.171	106.015	-1.07 ±0.14	+2.69 ±0.17
KIAT (1994-2003)	50.373	106.494	-0.51 ±0.14	+3.18 ±0.15
Среднее по 5 пунктам	51.69	107.51	-0.84	+1.89
ULAB (1994-2004)	47.865	107.052	-0.71 ±0.11	+2.28 ±0.19
Среднее по 6 пунктам	51.05	107.43	-0.82	+1.95

учетом сети забайкальских станций и на Дальнем Востоке только пункта ZMEY (+1.53±0.62 мм (N), +1.30±0.51 мм (E)). В этом случае в качестве восточной границы Амурской плиты принят разлом Дунми системы разломов Тан-Лу. Полученные положения полюса вращения плиты оказались очень близки.

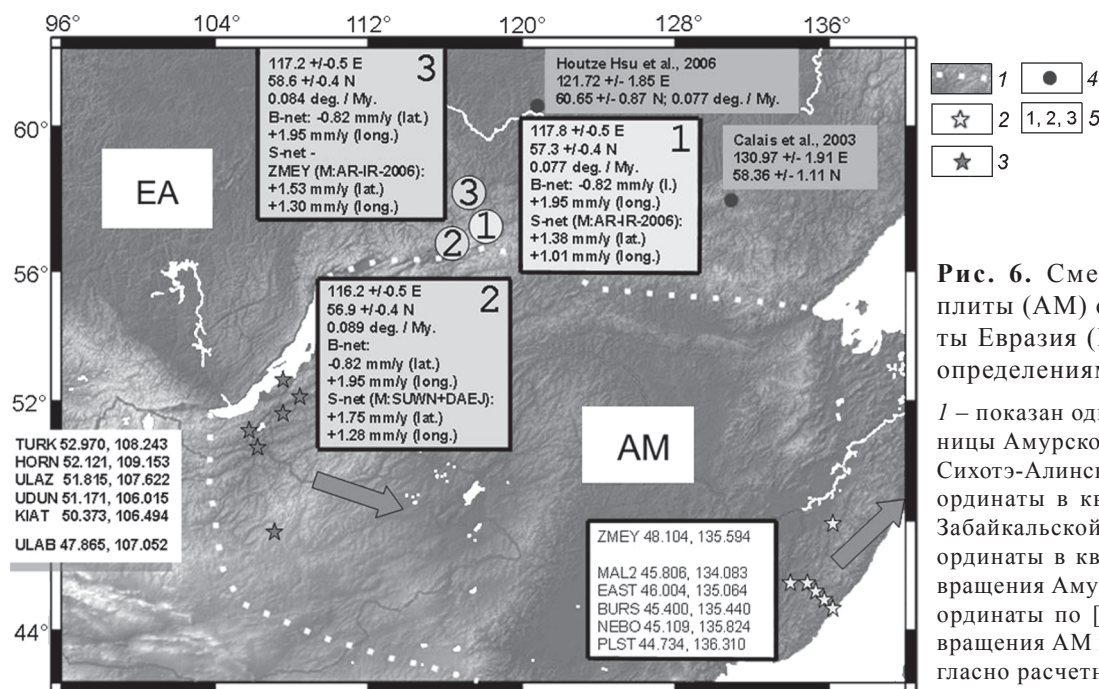


Рис. 6. Смещение Амурской плиты (AM) относительно плиты Евразия (EA) по различным определениям.

1 – показан один из вариантов границы Амурской плиты; 2 – пункты Сихотэ-Алинской GPS сети и их координаты в квадрате; 3 – пункты Забайкальской GPS сети, и их координаты в квадрате; 4 – полюса вращения Амурской плиты и их координаты по [13, 17]; 5 – полюса вращения AM и их координаты, согласно расчетным моделям.

Эти три решения, а также последние решения по сейсмологическим данным и по данным GPS геодезии, полученным для Забайкалья и Монголии [13, 17], приведены на рис. 6. Сходство положений полюса, построенных по трем разным решениям для восточной границы Амурской плиты, видимо, свидетельствует о едином движении восточной границы и ее обрамления. Полученное решение близко к определениям, полученным по данным о механизмах очагов землетрясений в Байкальской рифтовой зоне [2]. Область среднего положения полюса ($57.6^{\circ} \pm 0.5^{\circ} \text{N}$, $117.1^{\circ} \pm 0.5^{\circ} \text{E}$) оказывается приуроченной к известной своей высокой сейсмичностью (потенциальная сейсмичность 10 баллов) Чарской впадине и Кодаро-Удоканской зоне [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате геодинамических исследований с использованием GPS метода на Сихотэ-Алинском профиле в период 2003–2006 гг. получены оценки скоростей современных движений региона. Зарегистрированы смещения на восток (7–10 мм в год) пунктов сети относительно пункта YSSK (Южно-Сахалинск). Анализ результатов по восточной и западной частям Сихотэ-Алинской сети позволил получить оценки (≈ 1.5 мм в год) левостороннего смещения по Центрально-Сихотэ-Алинскому разлому с наличием растяжения на восток. Для расчета смещений относительно Евразийской плиты были проанализированы существующие модели вращения плиты. Предложена модель AR-IR-2006 твердотельного вращения Евразии с параметрами: координаты полюса враще-

ния 51.045°N по широте, 255.842° по долготе при скорости вращения 0.2423° в млн лет. Используя модель AR-IR-2006, вычислены аномальные смещения Сихотэ-Алинской сети, получено смещение на СВ. Данные по Сихотэ-Алинской и Забайкальской сетям использованы для определения параметров вращения Амурской плиты. В среднем для положения полюса получены значения: $57.6^{\circ} \pm 0.5^{\circ} \text{N}$, $117.1^{\circ} \pm 0.5^{\circ} \text{E}$ и $0.083^{\circ} \pm 0.004$ в млн лет. В пределах полученных ошибок наблюдений не обнаружено значительных различий при различных положениях восточной границы Амурской плиты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 07-05-00077, №07-05-007260-а; гранта Президиума РАН № 16, проект № 3; интеграционных проектов СО РАН №№ 27, 87, 116; Государственного Контракта № 02.515.11.5066 и интеграционных проектов ДВО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардуков Д.Г. Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // Докл. РАН. 2005. Т. 405, № 6. С. 804–809.
2. Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А. Введение в геодинамику. М: Недра, 1979. 311 с.
3. Карсаков Л.П., Чжао Чуньцин, Горошко М.В. и др. Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центрально-Азиатского и Тихоокеанского поясов: Объясн. зап. к тектонической карте. 1:1500000. Хабаровск–Владивосток: ДВО РАН, 2005. 264 с.
4. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др. Современные тектонические деформации центральной Азии по данным измерений методом GPS геодезии за 1994–

- 2004 г. // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 2 / Отв. ред. К.Г. Леви и С.И. Шерман. Ин-т земной коры. Иркутск: СО РАН, 2005. С. 26–38.
5. Малышев Ю.Ф., Подгорный В.Я., Шевченко Б.Ф. и др. Глубинное строение структур ограничения Амурской литосферной плиты // Тихоокеан. геология. 2007. Т. 26, № 2. С. 3–17.
 6. Сейсмическое районирование территории СССР / Ред. В.И. Бунз, Г.П. Горшков. М.: Наука, 1980, 307 с.
 7. Стеблов Г.М. Крупномасштабная геодинамика на основе космической геодезии: Автореф. дис.... д-ра физ.-мат. наук. М.: ИФЗ РАН, 2004. 32 с.
 8. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Дучков А.Д. и др. Сеть измерений в западной части Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 11. С. 1208–1215.
 9. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Кале Э. и др. Поля и модели смещений земной поверхности Горного Алтая // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 8. С. 923–937.
 10. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Горнов П.Ю. и др. Моделирование современных движений Евразийской плиты и ее южного обрамления (Горный Алтай, Приморье) по данным космической геодезии (GPS) // Фундаментальные проблемы геотектоники: Материалы Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2007. С. 273–277.
 11. Argus D.F., Gordon R.G. No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1 // Geophys. Res. Lett. 1991. N 18. P. 2039–2042.
 12. Boucher C., Altamimi Z., Sillard P., Feissel-Vernier M. The ITRF 2000 // IERS Technical Note. 2001. N. 31. 270 p.
 13. Calais E., Vergnolle M., San'kov V. et al. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002); Implications for current kinematics of Asia // J. of Geoph. Res. 2003 V. 108. B10. P. 2501.
 14. Drewes H. Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models // Geodynamics. M. Feissel (Ed.): IAG Symposia. Springer. 1998.
 15. De Mets C., Gordon R.G., D.F. Argus D.F., Stein S. Current plate motions // Geophys. J. Int. 1990. P. 101.
 16. De Mets C., Gordon R.G., D.F. 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, N. 20. P. 2191–2194.
 17. Houtze Hsu, Pil-Ho Park, Teruyuki Kato, et al. Amurian – A Nassiance Plate: New GPS Result Supplemented by Geological and Geophysical Evidence // Abstract Book. APSG 2006. The 6-th Workshop of Asia-Pacific Space Geodynamics Program. October 16–18. 2006. ICC Jeju. Jeju. Korea. 2006. P. 50.
 18. <http://neic.usgs.gov/neis/FM/neic-zfak-g.html>
 19. <http://sopac.ucsd.edu>
 20. <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/YSSK.html>
 21. <http://dgfi2.dgfi.badw-muenchen.de/geodis/GDYN/platemodels/html>
 22. <http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgc/index.html>
 23. <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>
 24. Kosuke H., Shin'ichi M., Hiroaki T. et al. The Amurian Plate motion and current plate kinematics in eastern Asia // J. Geoph. Res. 1999. V. 104, N B12. P. 147–29.155.
 25. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // Science. 1975. N 189. P. 419–426.
 26. Qi Wang, Pei-Zhen Zhang, Jeffrey T. Freymeller et al. Present-Day Crustal Deformation in China. Constrained by Global Positioning System Measurements // Science. 2001. N 294. P. 574–577.
 27. Zonenshain, L.P., Savostin L.A., Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics. 1981. N. 76. P 1–45.

Рекомендована к печати А.Н. Дуденко

V.Yu. Timofeev, P.Yu. Gornov, D.G. Ardyukov, Yu.F. Malyshev, Ye.V. Boiko

Results of the GPS measurement data analysis (2003–2006) of the Sikhote-Alin system, the Far East

The paper offers results of geodynamic research using the GPS method in the territory of the Far East. Measurements by the TRIMBLE-4700 GPS geophones were launched along the Sikhote-Alin profile in 2003. We consider the practical methods of conducting GPS measurements, the problems of choosing measurement sites and the Sikhote-Alin system configuration with reference to the structure of the region. The results of the GPS measurement data analysis (2003–2006) were used for the study of the fault system of the Far East continental margin. Different models of Eurasia rotation, from the known model NNR-NUVEL-1A to the recent ones, were analyzed. The AR-IR-2006 model was suggested for solid-body rotation of Eurasia with parameters of the rotation pole of 51.045°N latitudinally and 255.842° longitudinally, given the rotation velocity 0.2423°/m.y. Tentative estimates of parameters of the Amur plate rotation are offered (57.6°±0.5°N, 117.1°±0.5°E and 0.083°±0.004°/m.y.) using investigation data on the Sikhote-Alin and Transbaikal region.

Key words: GPS technologies, recent movements of the Earth's crust, Sikhote-Alin system, Eurasia rotation models, Amur plate.