

**КИНЕМАТИКА АМУРСКОЙ ПЛИТЫ ПО ДАННЫМ GPS-ГЕОДЕЗИИ**

**С.В. Ашурков, В.А. Саньков, А.И. Мирошниченко, А.В. Лухнев,  
А.П. Сорокин\*, М.А. Серов\*, Л.М. Бызов**

*Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия*

*\* Институт геологии и природопользования ДВО РАН, 675000, Благовещенск, пер. Речной, 1, Россия*

На сегодняшний день одной из актуальнейших проблем современной геодинамики восточной части Азии является вопрос о существовании Амурской плиты и ее границах. Его однозначное решение осложняется как сравнительно редкой и слабой сейсмичностью, так и часто геоморфологической невыразительностью межплитных границ. Одним из способов, с помощью которого можно преодолеть существующие проблемы, является метод спутниковой геодезии. На основании пяти повторных GPS-наблюдений с 2001 по 2007 г. на Амуро-Зейском геодинамическом полигоне, расположенном на территории Амурской области, нами было получено поле скоростей современных горизонтальных движений земной коры. На этой основе мы рассчитали параметры относительного вращения Евразийской и Амурских плит и нашли, что полюс их вращения имеет координаты  $122.285^\circ$  в.д.,  $58.950^\circ$  с.ш. и угловую скорость вращения  $0.095$  град./млн лет. Полученная кинематическая модель описывает движение Евразийской и Амурских плит как независимых тектонических единиц. Статистический анализ показал, что данная гипотеза верна на более чем 99%-м доверительном уровне. Кроме того, расчеты показали, что восточная граница Амурской плиты проходит по одной из ветвей системы разломов Тан-Лу. Полученная кинематическая модель для Евразийской и Амурской плит находится в хорошем согласии с данными о кинематике активных разломов и современном поле тектонических напряжений на межплитной границе.

*Современные движения земной коры, GPS-измерения, Амурская плита.*

**GPS GEODETIC CONSTRAINTS ON THE KINEMATICS OF THE AMURIAN PLATE**

**S.V. Ashurkov, V.A. San'kov, A.I. Miroshnichenko, A.V. Lukhnev,  
A.P. Sorokin, M.A. Serov, and L.M. Byzov**

Today, one of the most topical questions in the recent geodynamics of eastern Asia is that concerning the existence of the Amurian Plate and its boundaries. An unambiguous answer is difficult to obtain because seismicity is relatively rare and weak and the plate boundaries are often geomorphologically unclear. One of the methods that can help is satellite geodesy. In the present study, the velocity field of recent horizontal crustal movements was obtained from five repeated GPS observations on the Amur-Zeya geodynamic test ground (Amur Region) in 2001–2007. On this basis, the parameters of the relative rotation of the Eurasian and Amurian plates were calculated. The coordinates of their rotation pole were found to be  $122.285^\circ$ E and  $58.950^\circ$ N, and the angular rotation velocity  $0.095$  deg/Myr. The resulting kinematic model describes the motion of the Eurasian and Amurian Plates as independent tectonic units. According to statistical analysis, this hypothesis is true at a confidence level of more than 99%. Also, calculations have shown that the eastern boundary of the Amurian Plate passes through a branch of the Tan-Lu fault system. The kinematic model for the Eurasian and Amurian Plates agrees with data on the kinematics of active faults and the modern tectonic stress field at the plate boundary.

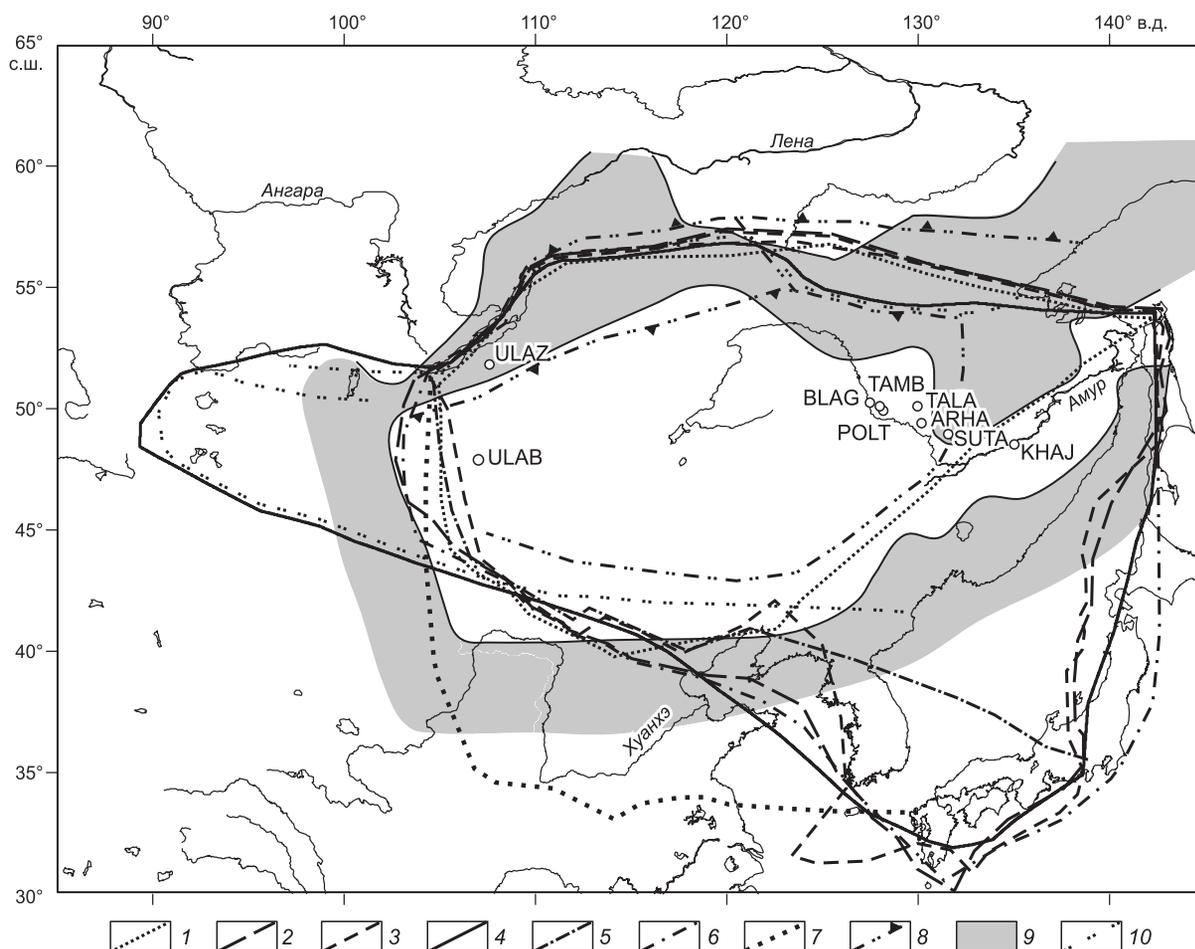
*Recent crustal movements, GPS measurements, Amurian Plate*

**ВВЕДЕНИЕ**

Согласно глобальной модели движения плит NUVEL-1A [DeMets et al., 1990, 1994], Амурская литосферная плита не выделяется, являясь неделимой частью Евразии. Тем не менее, начиная с работ Л.П. Зоненшайна с соавторами [1978, 1979] и в многочисленных последующих публикациях, Амурская плита рассматривается как отдельная тектоническая единица. По определению литосферная плита должна быть жесткой и, таким образом, смещаться как единое недеформируемое тело. В последние

годы этот тезис относительно Амурской плиты подтверждается данными измерений деформаций методами спутниковой геодезии [Calais et al., 2006].

В отношении восточной границы Амурской плиты среди исследователей не существует единого мнения (рис. 1). Согласно схемам [Зоненшайн и др., 1979; Zonenshain, Savostin, 1981], на которых Амурская плита выделена впервые, восточная граница этой тектонической единицы проходит вдоль сейсмоактивного структур о. Сахалин и прослеживается далее на юг через о. Хоккайдо и вдоль восточного побережья Японских островов. Позднее рисовка восточной границы претерпевала некоторые уточнения [Wei, Seno, 1998; Bird, 2003; Парфенов и др., 2003; Petit, Fournier, 2005]. Авторы приведенных работ проводили эту границу от южной части о. Сахалин ближе к западному побережью островов Хоккайдо и Хонсю, где она пересекает последний в центральной части, прослеживаясь в южном направлении и далее вновь вдоль глубоководного желоба. Существуют принципиально отличные варианты положения этой границы. Ю.Г. Гатинский и Д.В. Рундквист [2004] на основе опубликованных данных GPS-измерений провели границу от зал. Бохай по разломам системы Тан-Лу к северной оконечности о. Сахалин. При этом выделяется Японо-Корейский блок, включающий в себя Корейский полуостров, Японское и Восточно-Китайское моря, незначительную часть Северо-Восточного Китая к востоку от разлома Тан-Лу и Юго-Западную Японию. В.С. Имаев с соавторами [2003] также значительную часть восточной границы проводят по системе разломов Тан-Лу. Отличительной особенностью этой работы является то, что в северной части граница проходит вдоль сейсмического пояса, расположенного между 132 и 133 меридианами в пределах Баджало-Буреинского массива [Maskey et al., 2003], а на юге, не доходя до зал. Бохай, граница продолжается в западном направлении по субширотному разлому Иньшань-Яньшань. На основе плотностных и геоэлектрических разрезов литосферы Ю.Ф. Малышев с соавторами [2007] показывают границу Амурской плиты в виде полосы редуцированной (утоненной) литосферы, представленной орогенными поясами, на восточной границе — Сихотэ-Алинским орогеном.



**Рис. 1. Варианты проведения границ Амурской плиты по опубликованным данным.**

1 — [Гатинский, Рундквист, 2004], 2 — [Wei, Seno, 1998], 3 — [Bird, 2003], 4 — [Petit, Fournier, 2005], 5 — [Jin et al., 2007], 6 — [Зоненшайн и др., 1979], 7 — [Неки et al., 1999], 8 — [Имаев и др., 2000, 2003], 9 — [Малышев и др., 2007], 10 — [Шерман и др., 1984].

Положение границы Евразийской и Амурской плит также неоднозначно. Многие исследователи [Zonenshain, Savostin, 1981; Wei, Seno, 1998; Bird, 2003; Гатинский, Рундквист, 2004] проводят границу вдоль Байкальского и северной ветви Станового сейсмических поясов. Последний разделяется на две ветви: первая (северная) проходит по Становому хребту вплоть до Удской губы Охотского моря, вторая (южная) — вдоль Тукурингро-Джагдинского хребта. С.И. Шерман с коллегами [1984] проводят межплитную границу от Удской губы по югу Алданского щита, затем вдоль группы впадин северо-восточного фланга БРЗ, вдоль впадины о. Байкал и далее на запад по впадинам Северной Монголии. Схожее положение имеет граница по [Petit, Fournier, 2005]. Ю.Ф. Малышев с коллегами [2007] в качестве северной границы принимают пояс приподнятой астеносферы, который протягивается от Байкальского рифта на восток вдоль Джелтулакского разлома. Далее, согласно этим авторам, он проходит вдоль южной окраины Алдано-Станового щита, прослеживаясь по полосе мезозойско-кайнозойских впадин (Верхнезейская, Боконская) к Токинской впадине, сворачивая на северо-восток к Охотоморской литосферной плите. Л.М. Парфенов с соавторами [1987], а также В.С. Имаев с коллегами [2003] полагают, что межплитная граница представлена буферной зоной сейсмоактивных структур, северная граница которой соответствует Олекмо-Становому сейсмическому поясу, а южная — Монголо-Охотскому разлому. Буферная зона, по их модели, представлена в виде отдельных блоков (Забайкальского и Станового), при этом последний испытывает вращение против часовой стрелки. Забайкальский блок смещается на юго-восток, а Амурская плита в северо-восточном направлении.

В настоящей работе рассматривается проблема кинематики Амурской плиты, идентификации ее восточной границы и оценки характера взаимодействия с другими плитами вдоль северной и восточной границ на основе анализа данных GPS-измерений и геолого-геофизической информации по восточной части Евразии. Для этого используются оригинальные данные измерений с использованием GPS-технологии на территории Нижнезейской впадины и в Забайкалье. Решается задача получения кинематических характеристик литосферных плит с помощью моделирования вращения жестких блоков литосферы без учета упругих деформаций на их границах. Верификация модели проводится на основе сопоставления с геолого-геофизическими данными о современном напряженном состоянии земной коры, которое определяет кинематику активных разломов на границах плиты.

#### GPS-ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Начиная с 2001 г. в восточной части Амурской плиты на территории Амурской области нами проводятся регулярные измерения современных движений с помощью методов GPS-геодезии. Всего с 2000 по 2007 г. на Амуро-Зейском геодинамическом полигоне силами сотрудников Института земной коры СО РАН и Института геологии и природопользования ДВО РАН проведены 5 циклов повторных измерений на 6 пунктах геодинамической сети. Пункты сети (BLAG—TAMB—POLT—TALA—ARHA—SUTA) представляют собой субширотный профиль, протянувшийся от западной границы Нижнезейской впадины до предгорий Буреинского хребта (рис. 2).

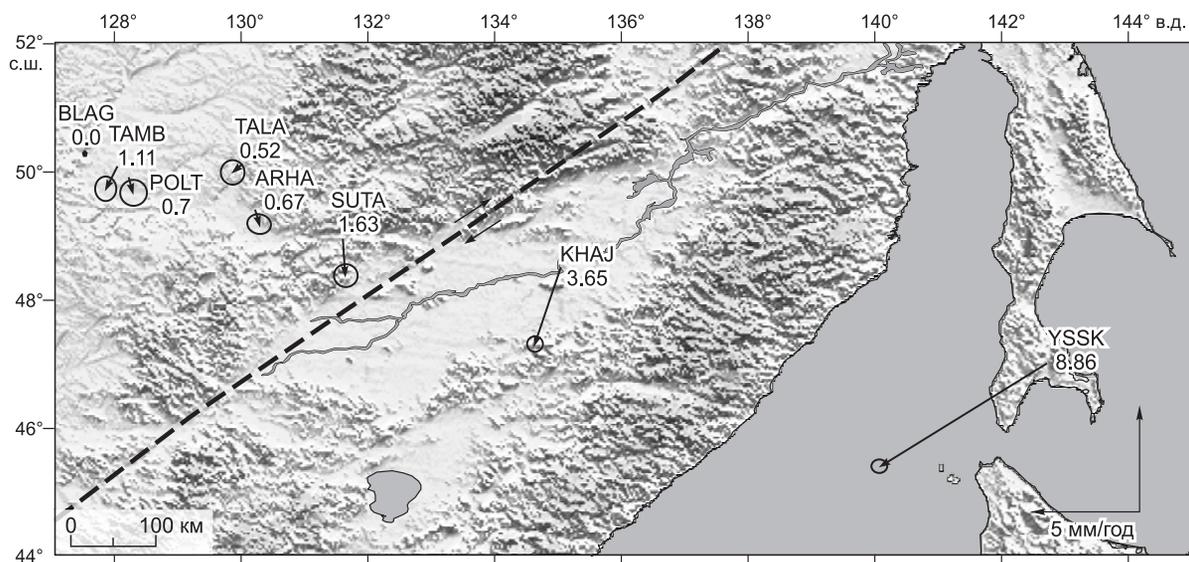


Рис. 2. Скорости относительно пункта BLAG (г. Благовещенск) в мм/год.

Эллипсами показаны ошибки измерений в 95%-м доверительном интервале, штриховой линией — разлом Тан-Лу.

Расчеты псевдорасстояний и фазовых измерений для каждого дня наблюдений производились программным пакетом GAMIT [Herring et al., 2006a]. На первом этапе обработки GPS-данных, используя дифференциальные фазовые наблюдения, мы рассчитали координаты пунктов, тропосферную задержку с интервалом 2 ч, параметры движения спутников, а также фазовые неоднозначности. Для решения использовались финальные орбиты спутников, предоставляемые Международной GPS-службой (IGS), параметры ориентации вращения Земли (IERS), таблицы зависимостей фазовых центров антенн от азимута и угла прихода спутникового сигнала, а также другие таблицы, рекомендованные IGS для расчетов. Для связи нашей сети с Международной системой отсчета ITRF2005 было использовано 28 IGS станций. На втором этапе мы объединили полученные ежедневные решения с результатами Scripps Orbital and Position Analysis Center (г. Сан-Диего, США, <http://sopac.ucsd.edu/>) для глобальных станций, используя фильтр Калмана (GLOBK) [Herring et al., 2006b]. При этом для уравнивания нашего решения с системой отчета ITRF2005 [Altamimi, 2007] были рассчитаны 14 параметров трансформации Хельмерта. Подробное описание расчета параметров между двумя системами можно найти в работе [Altamimi, 2002].

## ПОЛЕ СКОРОСТЕЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ НА АМУРО-ЗЕЙСКОМ ПОЛИГОНЕ

По результатам измерений было получено поле скоростей современных горизонтальных движений земной коры региона (см. рис. 2, табл. 1). Максимальная скорость субширотного укорочения установлена между станциями YSSK и КНАЖ и составляет  $-6.4$  мм/год. Отчетливо проявляется тенденция к быстрому затуханию деформации далее на запад. Последнее рассматривается нами как ослабление деформаций западнее ст. КНАЖ, связанных с широтным движением Охотоморской плиты. Для меридиональной составляющей векторов смещения отмечено, что с запада на восток, относительно пункта BLAG (г. Благовещенск), существует закономерное увеличение скоростей смещения на юг. Максимум относительного смещения ( $-1.8$  мм/год) фиксируется на участке между пунктами SUTA—КНАЖ, где закартирована зона разломов Тан-Лу. Полученные данные соответствуют правосторонней кинематике этого разлома (см. рис. 2). Выявленное резкое изменение кинематики пунктов в районе зоны разломов Тан-Лу дает основание полагать, что восточная граница Амурской плиты проходит именно по этой зоне.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЕВРАЗИЙСКОЙ И АМУРСКОЙ ПЛИТ

### Расчеты моделей вращений плит

В соответствии с теорией тектоники плит движение блоков земной коры подчиняется закону движения на сфере:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{\Omega} \times \mathbf{r}_i,$$

где  $\mathbf{v}_i$  — вектор движения наблюдаемой ( $i$ -й) станции,  $\mathbf{\Omega}$  — вектор вращения блока,  $\mathbf{r}_i$  — вектор положения точки на блоке, т.е. движение любого жесткого тела на сфере можно описать положением его полюса и скоростью вращения. Изначально для расчета полюсов вращения использовались данные простирающихся трансформных разломов, относительные скорости плит по океаническим полосовым магнитным аномалиям, а также направления относительного движения плит по данным векторов подвижек в очагах

Таблица 1. Скорости горизонтальных смещений GPS-пунктов относительно станции BLAG

Код станции	Координаты, град.		Скорость, мм/год	
	в.д.	с.ш.	восток—запад	север—юг
BLAG_GPS	127.521	50.257	0	0
TAMB_GPS	128.028	50.257	$-0.48 \pm 0.19$	$-1.00 \pm 0.22$
POLT_GPS	128.223	49.913	$0.20 \pm 0.25$	$-0.67 \pm 0.24$
TALA_GPS	130.014	50.101	$-0.42 \pm 0.22$	$-0.30 \pm 0.22$
ARNA_GPS	130.220	49.407	$0.18 \pm 0.21$	$-0.65 \pm 0.18$
SUTA_GPS	131.602	48.954	$0.13 \pm 0.22$	$-1.62 \pm 0.20$
КНАЖ_GPS	135.046	48.521	$-1.18 \pm 0.14$	$-3.45 \pm 0.13$
YSSK_GPS	142.717	47.030	$-7.57 \pm 0.14$	$-4.61 \pm 0.11$

Примечание. Ошибки определения скорости приведены в 95%-м доверительном интервале.

Таблица 2. Параметры вращения для двух моделей Амурской плиты относительно Евразии

Пункты, использованные в расчетах параметров вращения	Кол-во плит	Координаты, град.		Угловая скорость вращения блоков, град./млн лет	N	$\chi^2$	dof	F
		с.ш.	в.д.					
BLAG, TAMB, POLT, TALA, ARHA, SUTA, ULAZ, ULAB	1	58.950 ± 0.52	122.285 ± 0.73	0.095 ± 0.003	16	144.4	13	—
Те же + KHAJ	1	62.362 ± 0.81	129.249 ± 1.34	0.064 ± 0.003	18	358.8	15	9.65

Примечание. Положительное значение угловой скорости вращения блоков соответствует вращению против часовой стрелки. N — количество данных,  $\chi^2$  — сумма квадратов взвешенных остаточных скоростей, dof — степень свободы, F — значение для F-теста.

землетрясений. В последние десятилетия все чаще прибегают к результатам измерений методом GPS-геодезии.

**Евразийская плита.** Для определения параметров вращения Евразийской и Амурской плит необходимо определить группы станций, характеризующие движение плит как жестких тел. По аналогии с работами [Calais et al., 2003, 2006] были выбраны 12 станций, измерения на которых совпадали с временем наших наблюдений (YAKT, IRKT, ARTU, GLSV, GRAZ, WSRT, POTS, WTZR, CAGL, NRIL, NVSK, VILL). Затем для проверки корректности выбора GPS-пунктов, мы проанализировали остаточные скорости после вычитания модели ITRF2005–EU (рис. 3) и нашли, что пункт GRAZ имеет большую остаточную скорость и составляет 3.15 мм/год. В дальнейшем эта станция для определения Евразийской системы отсчета не использовалась. Таким образом, в финальном варианте Евразийскую плиту представляли 11 станций.

**Амурская плита.** Учитывая неоднозначность проведения восточной границы Амурской плиты, мы рассчитали два варианта относительного полюса ее вращения (табл. 2). В первом случае для Амурской плиты использовали шесть пунктов Амуро-Зейского полигона и две дополнительные станции, рас-

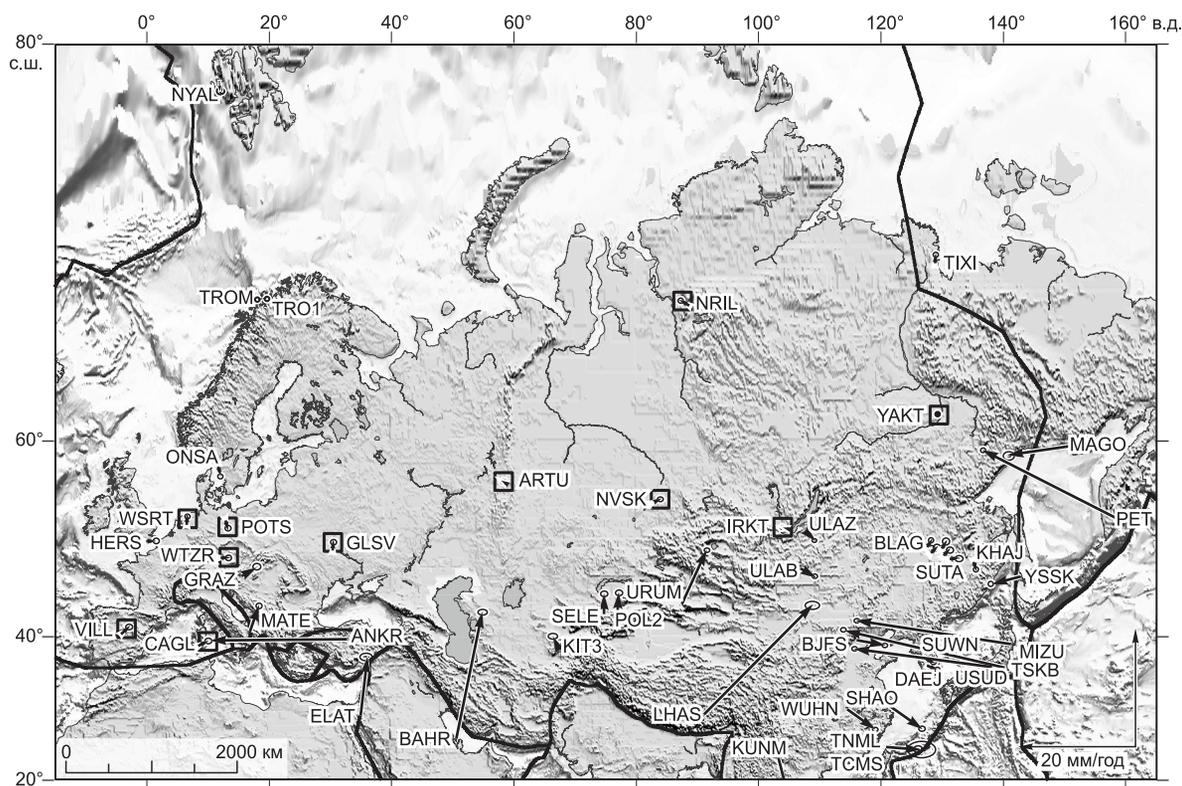


Рис. 3. Скорости современных горизонтальных смещений земной коры относительно Евразии.

В квадратах обозначены GPS-пункты, использованные для определения параметров вращения по модели ITRF2005–EU. Эллипсы обозначают ошибки измерений в 95%-м доверительном интервале. Черной линией показаны межплитные границы по модели NUVEL-1A.

положенные в западной части Амурской плиты ULAZ (г. Улан-Удэ), ULAB (г. Улан-Батор). Во втором случае использовались те же станции и постоянный пункт КНАЖ (г. Хабаровск), замыкающий на восток наш субширотный профиль и входящий в состав сети IGS.

Как видно (см. табл. 2), введение дополнительной точки КНАЖ в расчеты полюса привело к значительному его смещению. При таком положении полюса восточнее р. Олекма должна существовать зона растяжения с левосторонней сдвиговой составляющей вплоть до 129 меридиана. Это противоречит полю позднекайнозойских тектонических напряжений, построенному по результатам геолого-структурных исследований и сейсмологическим данным [Имаев и др., 2000], согласно которым для данной территории ось сжимающих напряжений имеет субдолготное простирание.

### Тестирование моделей

Выявленное резкое изменение широтной составляющей горизонтальных скоростей между пунктами SUTA и КНАЖ (см. выше по тексту), а также результаты работ [Имаев и др., 2000, 2003; Гатинский, Рундквист, 2004; Малышев и др., 2007] дали основание предположить, что восточная граница плиты проходит между этими двумя пунктами по зоне разломов Тан-Лу. Для проверки этой гипотезы был проведен статистический  $F$ -тест [Stein, Gordon, 1984] на принадлежность пункта КНАЖ к Амурской плите.

$$F = \frac{[(\chi^2_{(r)} - \chi^2_{(p)})]/(p - r)}{\chi^2_{(p)}/(N - p)},$$

где  $\chi^2_{(r)}$  и  $\chi^2_{(p)}$  — сумма квадратов взвешенных отклонений для модели со степенями свободы  $r$  и  $p$  соответственно,  $N$  — количество данных.

В качестве вводных параметров используются значения  $\chi^2$  — сумма квадратов взвешенных остаточных скоростей, которые рассчитываются по формуле:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(v_{\text{набл}(i)} - v_{\text{теор}(i)})^2}{\sigma^2},$$

где  $v_{\text{набл}(i)}$  — это наблюдаемая скорость в пункте  $i$ ,  $v_{\text{теор}(i)}$  — теоретическая скорость в точке  $i$ , рассчитанная из модели вращения плиты,  $\sigma^2$  — дисперсия наблюдаемой скорости в пункте  $i$ ,  $n$  — общее количество данных наблюдения.

$F$ -тест определяет, является ли уменьшение значения  $\chi^2$  больше, чем мы могли бы ожидать, только лишь из-за уменьшения вводных параметров. Если выражение  $F < f(|\text{dof1} - \text{dof2}|, \text{dof2}, \alpha)$ , где  $\alpha$  — уровень риска, не выполняется, то мы можем говорить о том, что модель с меньшим числом свободы (без ст. КНАЖ) значима на уровне доверия  $1 - \alpha$ . В результате установлено, что значение  $F$  составляет 9.65, что больше  $f$  для 99.9%-го уровня доверия, равного 6.7. Таким образом, можно утверждать, что станция КНАЖ не принадлежит Амурской плите, и, следовательно, ее восточная граница пролегает на участке между пунктами SUTA и КНАЖ.

Как уже отмечалось, сам вопрос о существовании Амурской плиты является дискуссионным. Для того чтобы проверить это предположение, мы также обратились к помощи  $F$ -теста,

Таблица 3. **Параметры рассчитанных абсолютных полюсов вращения и статистические характеристики для различных моделей блоковой делимости литосферы**

Плита	Кол-во плит	Координаты, град.		Угловая скорость вращения блоков, град./млн лет	$N$	$\chi^2$	dof	$F$
		с.ш.	в.д.					
Евразия + Амурская плита	1	55.851 ± 0.253	-97.076 ± 0.233	0.254 ± 0.001	38	855.1	35	—
Евразия	2	54.193 ± 0.276	-97.474 ± 0.243	0.246 ± 0.001	22	260.9	19	22.5
Амурская плита		68.494 ± 0.453	-113.942 ± 0.968	0.302 ± 0.002	16	144.4	13	

Примечание. Обозн. см. в табл. 2.

$$F = \frac{[\chi^2_{(\text{плита})} - \chi^2_{(\text{плита}+1)}] / 3}{\chi^2_{(\text{плита}+1)} / (N - 3p)},$$

где  $\chi^2_{(\text{плита})}$  — сумма квадратов взвешенных отклонений для модели с одним блоком,  $\chi^2_{(\text{плита}+1)}$  — значение для модели с двумя независимыми блоками,  $N$  — количество данных,  $p$  — количество полюсов Эйлера.

В нашем случае  $F$ -тест определяет, является ли уменьшение значения  $\chi^2$  при переходе от модели с большим числом свобод (1 плита) к модели с меньшим числом свобод (2 плиты) неслучайным. На основании предыдущих результатов  $F$ -теста мы не включили ст. КНАЖ в состав станций, определяющих движение Амурской плиты. Из табл. 3 видим, что полученное значение для  $F$ -теста равно 22.5, что значительно выше критического значения 4.46 при 99.9%-м уровне доверия. Это говорит о том, что гипотеза о возможном описании всех данных единым движением неоправданна, т.е. можно утверждать, что выделение Амурской плиты в качестве отдельной тектонической единицы правомерно.

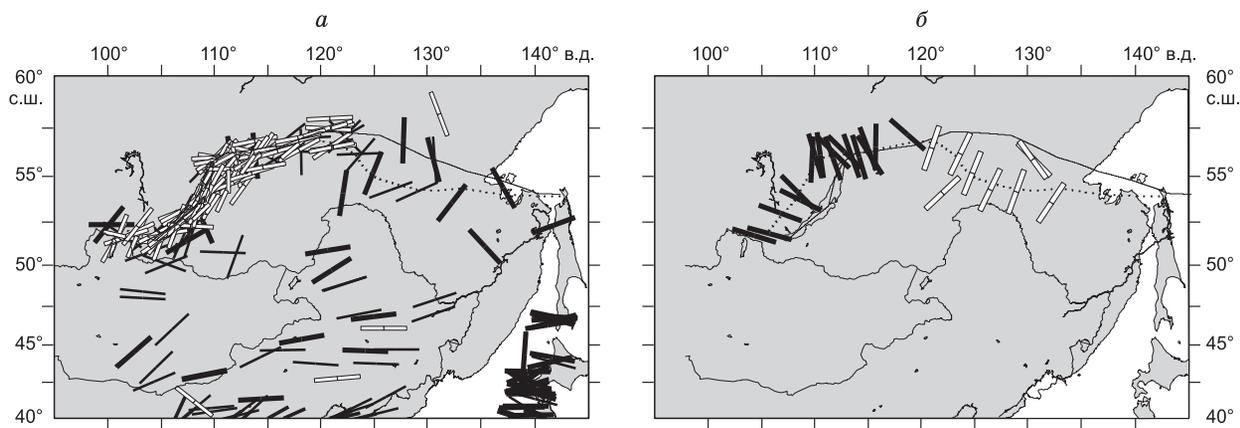
## ОБСУЖДЕНИЕ

На сегодняшний день опубликовано большое количество работ, посвященных кинематике плит и блоков Центральной и Северо-Восточной Азии, в которых используют законы движения на сфере. В табл. 4 приведены известные нам результаты определения параметров вращения Амурской плиты относительно Евразийской. Все они основаны на анализе двух типов данных. Первый — это сейсмологические данные. Параметры вращения рассчитывались по векторам подвижек в очагах землетрясений на межплитных границах [Zonenshain, Savostin, 1981; Парфенов и др., 1987; Wei, Seno, 1998]. Остальные решения были получены по результатам GPS-измерений.

Мы использовали азимуты максимальных горизонтальных напряжений сжатия (рис. 4, а), а также направления векторов подвижек в очагах землетрясений (см. рис. 4, б) для сравнения их с направлениями движений, рассчитанными по параметрам вращения плит в упомянутых работах. Азимуты векторов подвижек в очагах землетрясений для БРЗ были взяты из публикации [Petit et al., 1996], для Олекмо-Становой и расположенной южнее Тукурингро-Джагдинской сейсмических зон из [Парфенов и др., 1987]. В работе [Petit et al., 1996] авторы рассчитали обобщенные вектора подвижек для главных разломов БРЗ, тогда как Л.М. Парфенов с коллегами [1987] дают решения для отдельных сейсмических событий. Вдоль северной границы Амурской плиты отчетливо проявляется смена типа напряженного состояния (см. рис. 4) с СЗ-ЮВ растяжения в пределах БРС на ССВ-ЮЮЗ сжатие в Олекмо-Становой области, включая Тукурингро-Джагдинский хребет, в пределах которого, по мнению авторов [Шевченко, Каплун, 2007], в обстановке косоугольного сжатия осуществляется подвиг Евразийской плиты под Амурскую

Таблица 4. Параметры вращения Амурской плиты относительно Евразийской

Источник	Координаты, град.		Скорость вращения, град./млн лет	Ошибка определения полюса, град.	
	в.д.	с.ш.		долгота	широта
[Sella et al., 2002]	158.760	44.180	0.107±0.100	33.3	6.60
[Kreemer et al., 2003]	157.500	58.500	0.034±0.013	5.50	3.40
[Prawirodirdjo, Bock, 2004]	154.747	45.433	0.093±0.23	43	4.4
[Jin et al., 2007]	153.417	50.464	0.056±0.008	10.0	2.90
[Shestakov et al., 2008]	150.824	59.778	0.037	—	—
[Apel et al., 2006]	148.350	51.626	0.063±0.017	5.31	4.20
[Calais et al., 2006]	133.000	57.400	0.077±0.016	4.90	2.14
[Wei, Seno, 1998]	123.250	60.420	0.025	—	—
[Настоящая работа]	122.285	58.950	0.095±0.003	0.730	0.519
[Hsu et al., 2006]	121.720	60.653	0.102±0.002	1.65	0.87
[Парфенов и др., 1987]	118.020	57.900	0.410	—	—
[Zonenshain, Savostin, 1981]	117.450	56.590	0.100	—	—
[Тимофеев и др., 2008]	117.100	57.600	0.083	—	—
[Heki et al., 1999]	106.600	-22.30 ю.ш.	-0.091	20.5	3.50



**Рис. 4.** Поле напряжений (*а*) и вектора подвижек в очагах землетрясений (*б*).

Сплошной и пунктирной линиями обозначены варианты проведения межплитной границы. *а* — направления максимальных горизонтальных напряжений сжатия [Heidbach et al., 2008], толстые черные отрезки соответствуют надвиговому типу механизмов землетрясений, тонкие черные — сдвиговому, белые — сбросовому; *б* — черными отрезками показаны вектора подвижек для БРЗ [Petit et al., 1996], белыми указаны векторы подвижек для Олекмо-Становой и Тукурингро-Джагдинской сейсмических зон [Парфенов и др., 1987].

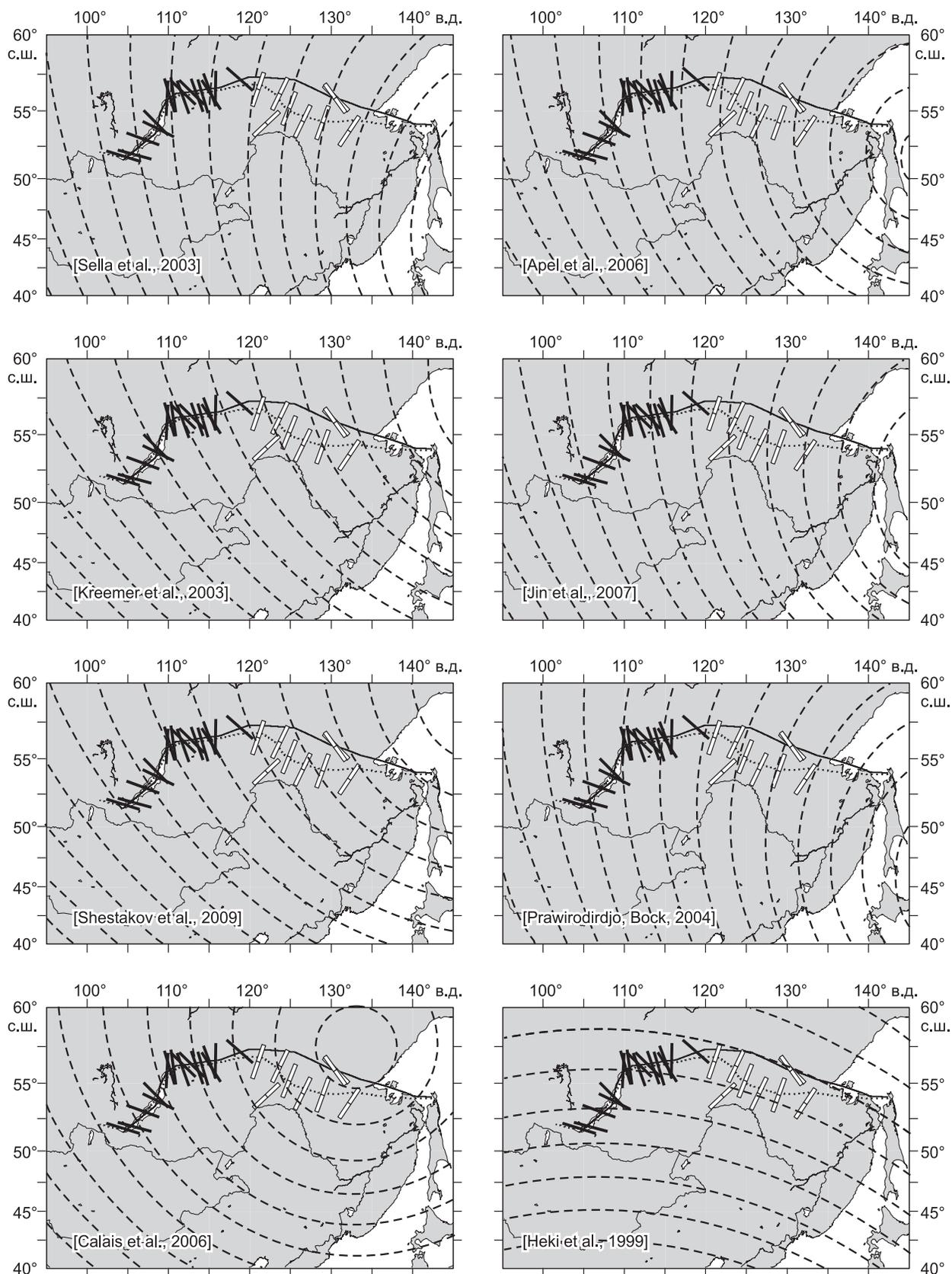
либо надвиг последней на Евразийскую. В.С. Имаев с соавторами [2000, 2003] на основании геологоструктурных и сейсмологических данных делают вывод, что смена напряженно-деформированного состояния земной коры происходит в районе среднего течения р. Олекма вблизи 121 меридиана.

На рисунках 5, 6 изображены малые круги, их центром являются полюса вращения для каждого решения из табл. 4. Полученные в работах [Zonenshain, Savostin, 1981; Wei, Seno, 1998] полюса по данным векторов подвижек в очагах землетрясений в пределах лишь БРЗ хорошо описывают смену напряженно-деформированного состояния на всей межплитной границе. Эйлера полюс Амурской плиты относительно Евразии [Парфенова и др., 1987] рассчитан по данным слип-векторов трех землетрясений, эпицентры последних расположены вдоль северной границы выделяемого авторами Станового блока. Это решение также хорошо соответствует напряженно-деформированному состоянию вдоль северной границы Амурской плиты.

Известные публикации по определению полюсов вращения по данным GPS можно условно разделить на две основные группы. К первой группе относятся работы [Sella et al., 2002; Kreemer et al., 2003; Prawirodirdjo, Bock, 2004; Apel et al., 2006; Calais et al., 2006; Jin et al., 2007; Shestakov et al., 2009], в которых положение полюса вращения расположено значительно восточнее 121 меридиана (см. рис. 5), и при этом невозможно объяснить наблюдаемое напряженно-деформированное состояние на всем протяжении границы между Амурской и Евразийской плитами.

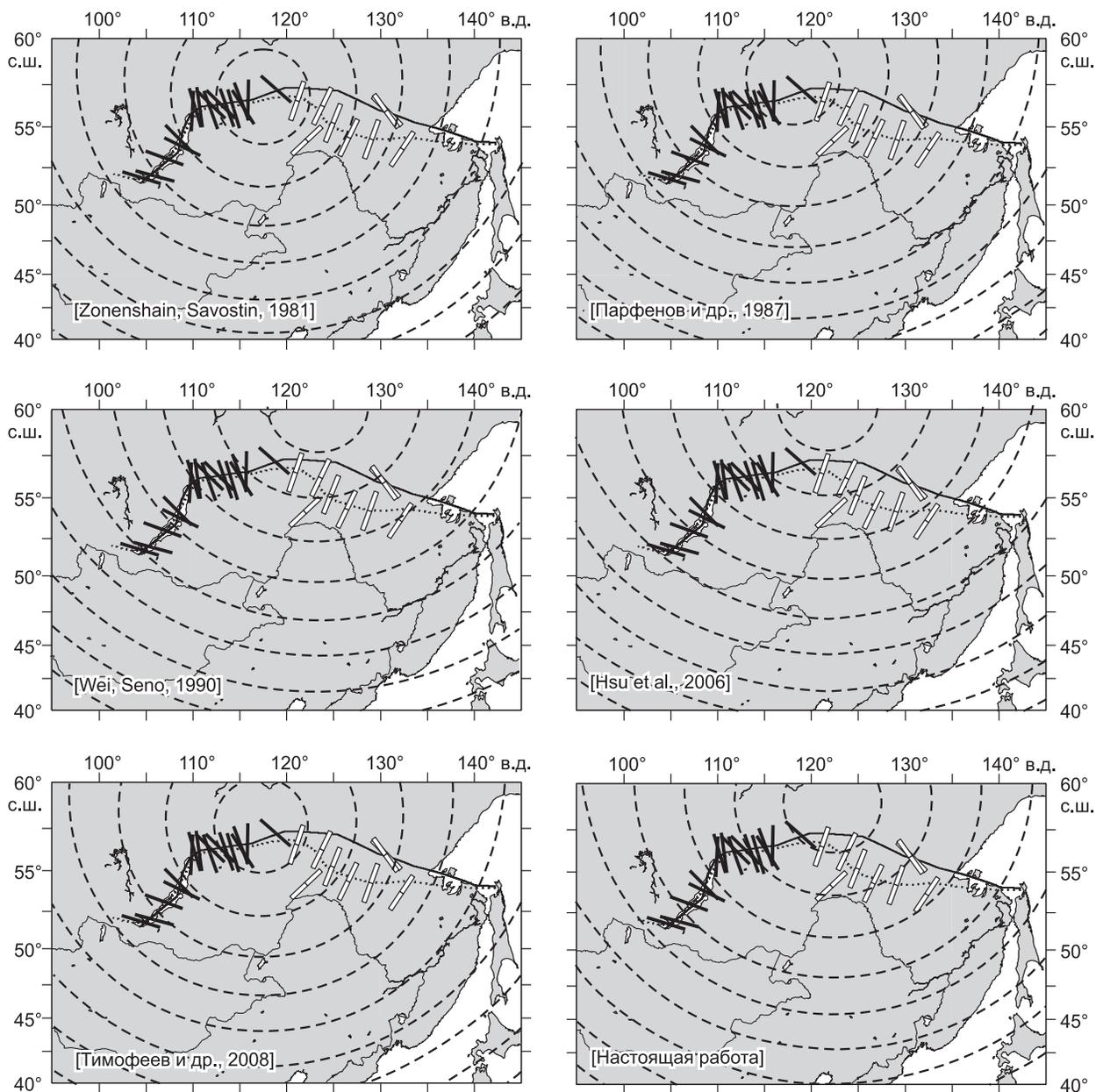
В другую группу (см. рис. 6) входят работы [Hsu et al., 2006; Тимофеев и др., 2008] и настоящая статья, их результаты хорошо согласуются с полем напряжений и со смещениями по активным разломам в центральной и северо-восточной части БРЗ и Олекмо-Становой области.

Одной из причин, объясняющих такое многообразие решений, является выбор разных станций, характеризующих движение плит, т.е. при различных положениях границ Амурской плиты исследователи используют разный набор GPS-пунктов. Кроме того, авторы, применяющие GPS-измерения, неоднократно отмечали неравномерное распределение станций по территории Амурской плиты и их малочисленность. Например, в статьях [Sella et al., 2002; Prawirodirdjo, Bock, 2004] для расчетов параметров вращения Амурской плиты было использовано только 3 станции. К. Кремер с соавторами [Kreemer et al., 2003] использовали уже 6 станций. Ш. Джин с коллегами [Jin et al., 2007] получили полюс на основе 11 пунктов, авторы публикации [Apel et al., 2006] объединили данные трех работ и получили решение по 32 станциям, В.Ю. Тимофеев с коллегами [2007] использовали 12 станций, объединив данные 6 забайкальских и 6 дальневосточных GPS-пунктов. В большинстве работ в состав GPS-станций, относящихся к Амурской плите, был включен пункт КНАЖ, который, по нашим данным, расположен за пределами территории Амурской плиты, а кроме того, ни в одной из них Амурская плита не представлена своей значительной и неотъемлемой частью, а именно Амуро-Зейским бассейном. В этом отношении проведенные нами измерения на территории Амурской области позволяют существенно улучшить оценки параметров вращения Амурской плиты.



**Рис. 5. Сравнение векторов подвижек в очагах землетрясений с моделями вращения Амурской плиты относительно Евразийской, по расчетным и опубликованным данным.**

Штриховыми линиями показаны малые круги с центром в полюсах вращения (см. табл. 3). Остальные усл. обозн. см. на рис. 4, б.



**Рис. 6. Сравнение векторов подвижек в очагах землетрясений с моделями вращения Амурской плиты относительно Евразийской, по расчетным и опубликованным данным.**

Усл. обозн. см. рис. 4, б; 5.

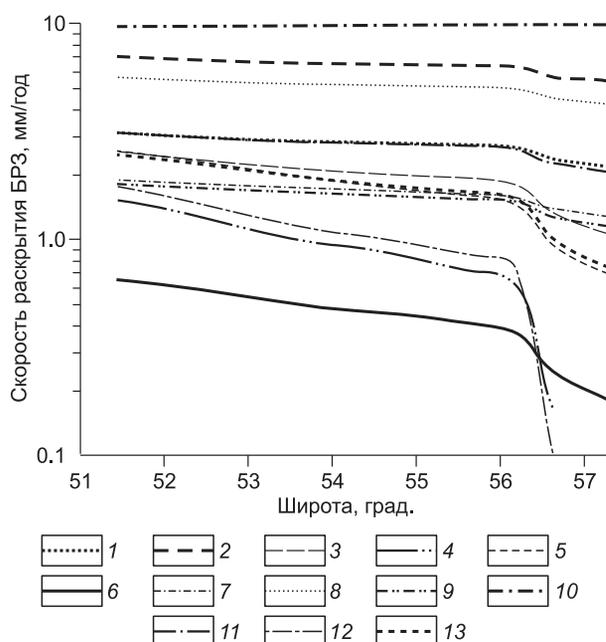
Мы сравнили скорости раскрытия БРЗ, используя значения опубликованных и наших собственных расчетов полюса вращения Амурской плиты в Евразийской системе отсчета (рис. 7, см. табл. 4). Можно увидеть, что скорость растяжения БРС по нашей расчетной модели идентична скоростям в работе [Hsu et al., 2006]. Полученная нами скорость составляет 2.3 мм/год для южной части о. Байкал. В северной части Байкальской впадины скорость дивергенции составляет 1.25 мм/год. Далее, в связи с изменением простирающей межплитной границы и резким уменьшением углового расстояния до полюса вращения мы наблюдаем резкое уменьшение линейной скорости.

Оценки, полученные нами на начальной стадии исследований [Саньков и др., 1999] и позднее, по уточненным данным измерений на региональной GPS-сети для центральной части Байкальской рифтовой системы [Саньков и др., 2009], составляют  $3.4 \pm 0.7$  мм/год. Вполне вероятно, что повышенные скорости растяжения на межплитной границе в ближней зоне, которая изучалась В.А. Саньковым с соавторами [2009], содержат составляющую горизонтальных движений, возникающую за счет коллапса

**Рис. 7. Сравнение скоростей раскрытия Байкальской рифтовой зоны по расчетным и опубликованным данным.**

1 — [Jin et al., 2007], 2 — [Sella et al., 2003], 3 — [Calais et al., 2006], 4 — [Тимофеев и др., 2008], 5 — [Hsu et al., 2006], 6 — [Wei, Seto, 1998], 7 — [Kreemer et al., 2003], 8 — [Prawirodirdjo, Bock, 2004], 9 — [Shestakov et al., 2009], 10 — [Heki et al., 1999], 11 — [Apel et al., 2006], 12 — [Zonenshain, Savostin, 1981], 13 — [Настоящая работа].

поднятий, сопровождающих рифтовую систему. В частности, наличие такой составляющей доказывается в работе [Vergnoille et al., 2007] на основе математического моделирования и сопоставления с данными GPS-измерений в Центральной Азии. С другой стороны, возможно, разница в скоростях в 1 мм/год связана с дополнительным влиянием локального источника сил.



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории Амурской области с 2001 по 2007 г. проведены пять циклов GPS-измерений на субширотном профиле от западной границы Нижнезейской впадины до предгорий Буреинского хребта. В результате получено поле скоростей современных горизонтальных движений земной коры. Было выявлено резкое ослабление деформаций западнее ст. КНАЖ в направлении восток—запад, и в то же время здесь установлена максимальная разница в скоростях в меридиональном направлении, соответствующая правосторонней кинематике одной из ветвей системы разломов Тан-Лу.

Кинематические характеристики литосферных плит получены с помощью моделирования вращения жестких блоков литосферы по данным GPS-измерений горизонтальных скоростей без учета упругих деформаций на их границах. В результате показано, что кинематика исследуемого региона может быть описана независимым от Евразии движением Амурской плиты на доверительном уровне свыше 99 %. На том же уровне доверия было установлено, что ст. КНАЖ не принадлежит Амурской плите. Следствием последнего является вывод, что восточная граница Амурской плиты проходит на участке между станциями КНАЖ и SUTA по зоне разломов системы Тан-Лу (см. рис. 2).

Исходя из полученных параметров вращения блоков, найдены скорости раскрытия Байкальского рифта. На юге о. Байкал скорость составляет 2.3 мм/год, на северной его оконечности уже 1.25 мм/год. Далее в северо-восточном направлении вдоль сухопутных впадин БРС скорость резко падает (см. рис. 7).

Полученная модель в целом соответствует геолого-геофизическим данным о напряженном состоянии и кинематике разломов на Байкало-Становой границе Амурской плиты. Особо отметим соответствие полученных решений главной тенденции — смене обстановки растяжения в БРС на режим сжатия в Олекмо-Становой и Тукурингро-Джагдинской сейсмических зонах.

Рисунки в этой работе были выполнены с помощью пакета программ GMT [Wessel, Smith, 2007]. Авторы выражают искреннюю признательность Э. Кале (Purdue University, West Lafayette, USA) за консультацию по статистическому анализу GPS-данных.

Работа выполнялась при частичной поддержке РФФИ (грант 08-05-00992, 09-05-00703), программы ОНЗ РАН № 7 и МИП СО РАН № 56.

### ЛИТЕРАТУРА

- Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии — тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника, 2004, № 1, с. 3—20.
- Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А., Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. Тектоника плит Байкальской горной области и Станового хребта // Докл. АН СССР, 1978, т. 240, № 3, с. 669—672.
- Зоненшайн Л.П., Савостин Л.А., Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. Геодинамика Байкальской рифтовой зоны и тектоника плит внутренней Азии // Геолого-геофизические и подводные исследования озера Байкал. М., ИО АН СССР, 1979, с. 157—211.

- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М.** Сейсмотектоника Якутии. М., ГЕОС, 2000, 227 с.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М., Николаев В.В., Семенов Р.М.** Буферные сейсмогенные структуры между Евразийской и Амурской литосферными плитами на юге Сибири // Тихоокеанская геология, 2003, т. 22, № 6, с. 55—61.
- Малышев Ю.Ф., Подгорный В.Я., Шевченко Б.Ф., Романовский Н.П., Каплун В.Б., Горнов П.Ю.** Глубинное строение структур ограничения амурской литосферной плиты // Тихоокеанская геология, 2007, т. 26, № 2, с. 3—17.
- Парфенов Л.М., Козьмин Б.М., Имаев В.С., Савостин Л.А.** Тектоническая природа Олекмо-Становой сейсмической зоны // Геотектоника, 1987, № 6, с. 94—108.
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртоого О., Янь Х.** Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология, 2003, т. 22, № 6, с. 7—41.
- Саньков В.А., Леви К.Г., Кале Э., Девершер Ж., Лесне О., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Буддо В.Ю., Залуцкий В.Т., Башкуев Ю.Б.** Современные и голоценовые горизонтальные движения на Байкальском геодинамическом полигоне // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (3), с. 422—430.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Кале Э., Девершер Ж., Дембелов М.Г.** Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // Докл. РАН, 2009, т. 424, № 5, с. 664—668.
- Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Ардюков Д.Г., Малышев Ю.Ф., Бойко Е.В.** Результаты анализа данных GPS измерений (2003—2006 гг.) на Дальнем Востоке по Сихотэ-Алинской сети // Тихоокеанская геология, 2008, т. 27, № 4, с. 39—49.
- Шевченко Б.Ф., Каплун В.Б.** Модель глубинной геодинамики области сочленения Евразийской и Амурской литосферных плит // Литосфера, 2007, № 4, с. 3—20.
- Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Рассказов С.В.** Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск, Наука, 1984, 207 с.
- Altamimi Z., Sillard P., Boucher C.** ITRF2000: a new release of the international terrestrial reference frame for earth science applications // *J. Geophys. Res.*, 2002, v. 107, № B10, 2214, doi:10.1029/2001JB000561.
- Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C.** ITRF2005: a new release of the international terrestrial reference frame based on time series of station positions and Earth orientation parameters // *J. Geophys. Res.*, 2007, v. 112, № B9, B09401, doi:10.1029/2007JB004949.
- Apel E.V., Burgmann R., Steblov G., Vasilenko N., King R., Prytkov A.** Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // *Geophys. Res. Lett.*, 2006, v. 33, № 11, L11303, doi:10.1029/2006GL026077.
- Bird P.** An updated digital model of plate boundaries // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2003, v. 4, № 3, 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Likhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal Sh., Deverechere J.** GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994—2002): implications for current kinematics of Asia // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, № B10, 2501, doi:10.1029/2002JB002373.
- Calais E., Dong L., Wang M., Shen Z., Vergnolle M.** Continental deformation in Asia from a combined GPS solution // *Geophys. Res. Lett.*, 2006, v. 33, № 24, L24319, doi:10.1029/2006GL028433.
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.** Current plate motions // *Geophys. J. Int.*, 1990, v. 101, p. 425—478.
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.** Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale on estimates of current plate motions // *Geophys. Res. Lett.*, 1994, v. 21, № 20, p. 2191—2194.
- Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfeß D., Müller B.** The World Stress Map database release 2008, 2008, doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel2008.
- Heki K., Miyazaki S., Takahashi H., Kasahara M., Kimata F., Miura S., Vasilenko N.F., Ivashchenko A., An K.D.** The Amurian Plate motion and current plate kinematics in eastern Asia // *J. Geophys. Res.*, 1999, v. 104, № B12, p. 29147—29155.
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.** Reference manual GAMIT. GPS analysis at MIT release 10.3. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2006a, [http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT\\_Ref\\_10.3.pdf](http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT_Ref_10.3.pdf).
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.** GLOBK reference manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program release 10.3. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, 2006b, [http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GLOBK\\_Ref\\_10.3.pdf](http://chandler.mit.edu/~simon/gtgk/GLOBK_Ref_10.3.pdf).

**Hsu H., Park P.-H., Kato T., Xiong X.** Study on crustal movement of the Eastern Asia by GPS technique // Proceedings of the APSG symposium: space geodesy and dynamic planet / Eds. Cheng Hyang, Ruixian Zhou. Korea, APSG, 2006, p. 182—188.

**Jin Sh., Park P.-H., Zhu W.** Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations // Earth Planet. Sci. Lett., 2007, v. 257, p. 486—496.

**Kremer C., Holt W.E., Haines A.J.** An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation // Geophys. J. Int., 2003, v. 154, № 1, p. 8—34.

**Mackey K.G., Fujita K., Gounbina L.V., Koz'min B.M., Imaev V.S., Imaeva L.P., Sedov B.M.** Explosion contamination of the Northeast Siberian seismicity catalog: implication for natural earthquake distributions and location of the Tanlu Fault in Russian // Bull. Seismol. Soc. Amer., 2003, v. 93, № 2, p. 737—746.

**Petit C., Fournier M.** Present-day velocity and stress fields of the Amurian plate from thin-shell finite-element modeling // Geophys. J. Int., 2005, v. 160, p. 357—369.

**Petit C., Deverchere J., Houdry F., San'kov V., Melnikova V., Delvaux D.** Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implications // Tectonics, 1996, v. 15, № 6, p. 1171—1191.

**Prawirodirdjo L., Bock Y.** Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations // J. Geophys. Res., 2004, v. 109, № B8, B08405, doi:10.1029/2003JB002944.

**Sella G.F., Dixon T.H., Mao A.** REVEL: a model for recent plate velocities from space geodesy // J. Geophys. Res., 2002, v. 107, № B4, 2081, doi:10.1029/2000JB000033.

**Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Kolomiets A.G., Bormotov V.A., Gerasimov G.N., Tatakashi H., Kasahara M., Kato T.** About current geodynamic activity of the Central Sikhote-Alinsky fault and southern part of the Russian Far East as a whole according to GPS observations // The 8th Workshop of Asia-Pacific space geodynamics program: Abstract book. Novosibirsk, Academic Publishing House «Geo», 2009, p. 16—17.

**Stein S., Gordon R.** Statistical tests of additional plate boundaries from plate motion inversions // Earth Planet. Sci. Lett., 1984, v. 69, p. 401—412.

**Vergnolle M., Calais E., Dong L.** Dynamics of continental deformation in Asia // J. Geophys. Res., 2007, v. 112, B11403, doi:10.1029/2006JB004807.

**Wei D., Seno T.** Determination of the Amurian plate motion // Mantle dynamics and plate interaction in East Asia / Eds. M. Flower, S. Chung, C. Lo, T. Lee. 1998, p. 337—346.

**Wessel P., Smith W.H.F.** The generic mapping tools. Technical reference and cookbook version 4.2., 2007, <http://gmt.soest.hawaii.edu>.

**Zonenshain L.P., Savostin L.A.** Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia // Tectonophysics, 1981, v. 76, p. 1—45.

*Рекомендована к печати 25 декабря 2009 г.  
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию  
15 сентября 2009 г.*