

О ПАРАМЕТРАХ ВРАЩЕНИЯ СИБИРСКОГО ДОМЕНА И ЕГО ВОСТОЧНОГО
ОБРАМЛЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭПОХИ

*В.Ю. Тимофеев¹, А.Ю. Казанский¹, Д.Г. Ардюков¹, Д.В. Метелкин¹, П.Ю. Горнов²,
Н.В. Шестаков^{3,4}, Е.В. Бойко¹, А.В. Тимофеев¹, Г.З. Гильманова²*

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, пр-т Акад. Коптюга 3,
г. Новосибирск, 630090, e-mail: TimofeevVY@ipgg.nsc.ru

²Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000,
e-mail: gornov@itig.as.khb.ru

³Институт прикладной математики ДВО РАН, ул. Радио 7, г. Владивосток, 690041,
e-mail: nikon@phys.dvgu.ru

⁴Дальневосточный федеральный университет, ул. Октябрьская 27, г. Владивосток, 690000

Поступила в редакцию 15 октября 2010 г.

Проведен анализ движения тектонических блоков Земли в области сочленения Евразийской плиты с ее окружением. Рассмотрен современный этап с использованием данных космической геодезии и сейсмологии. Для Евразии рассмотрены модели твердотельного плитного движения. Приведен пример использования модели Евразии (северной части Азии) для определения параметров вращения ее южного обрамления – Амурской плиты – на основе GPS данных по Дальнему Востоку (Сихотэ-Алинский профиль) и Забайкалью. Использование модели Амурской плиты проиллюстрировано для зоны растяжения на западной ее границе – впадины озера Байкал в эпоху Култукского землетрясения ($M = 6.3$, 27.08.2008). По палеомагнитным данным определен полюс вращения Сибирского кратона относительно его складчатого обрамления в течение мезозоя и сделана оценка кинематических параметров. Неизменное положение полюса вращения в относительной системе координат с конца палеозоя по настоящее время свидетельствует о постоянстве вращения Сибирского домена в структуре Евразийской плиты.

Ключевые слова: вращение тектонических плит, современный этап, мезозой, GPS метод, палеомагнитный метод, Сибирский домен, Евразийская плита.

ВВЕДЕНИЕ

Кинематика системы тектонических плит Земли в настоящее время активно изучается на основе данных космической геодезии. Для разных геологических эпох взаимодействие плит рассматривается с использованием палеомагнитного метода. На наш взгляд, интересно сравнить данные двух методов на примере относительного движения обрамления Сибирской платформы. Современный этап рассматривается с использованием GPS метода на примере взаимодействия северной части Азии и ее южного обрамления – Амурской плиты. Относительные вращения в мезозое анализируются палеомагнитным методом. Деформации с мезозоя до современности происходили по границам Сибирского

домена. Параметры вращения (положение Эйлера полюса и скорости), полученные для различных геологических эпох, могут дать важную информацию о тенденциях в геологической истории Земли. Представления о движениях внутри Евразийской плиты определяют появление землетрясений определенного типа на внутриплитных границах.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЛИТНЫХ И КОСЕЙСМИЧЕСКИХ СОВРЕМЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ

Рассмотрим современные плитные движения, используя имеющиеся кинематические модели [34, 36, 41, 42, 56], и проанализируем их на примере Евразии. В табл. 1 приведены некоторые из известных моделей вращения Евразии.

Таблица 1. Параметры твердотельного вращения Евразии. Положения полюса и скорость углового движения.

№	Модель	Широта в градусах	Долгота в градусах	Скорость вращения град./млн лет
1	NNR-NUVEL-1A	50.631	247.725	0.2337
2	APKIM-2000	57.9	262.9	0.2587
3	AR-IR-2006	51.045	255.842	0.2423
4	SOPAC-2008	55.851	262.622	0.263
5	Shestakov-2008	54.2	259.3	0.251

Модель NNR-Nuvel-1a построена по комплексу геолого-геофизических данных. Модели APKIM-2000 и SOPAC-2008 – это обобщение экспериментальных GPS данных постоянных станций Евразии за период 2000–2008 гг. Особенностью двух последних моделей является то, что при анализе использованы данные по всем имеющимся станциям, включая данные для центральной и южной частей Азии, где развивается активный тектонический процесс, отражающийся в современных землетрясениях региона [10, 33, 37, 38, 55]. Также следует учитывать неравномерность покрытия континента сетью постоянных GPS станций. При анализе активных процессов в центральной и южной частях Азии исследователи обычно используют информацию по северной недеформируемой части Евразии [18, 38, 47, 49, 58, 59]. При этом каждый автор создает свою модель для отдельной эпохи наблюдений. 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. При этом мы старались не опираться на данные станций, расположенных в зоне многолетней мерзлоты. Подробно наш подход к построению модели Евразии изложен в статье [29]. Главное здесь – это выделение недеформируемой части плиты. При проверке полученных результатов обычно используются методы статистических оценок [60]. В целом, следует сказать, что современный уровень развития GPS метода дает ошибку в определении скорости смещений пунктов наблюдений ± 1 мм/год, что и определяет в дальнейшем уровень ошибки в положении полюса вращения.

Как известно, для определения скоростей горизонтальных смещений отдельного пункта с координатами φ и λ используются следующие соотношения:

$$\partial\varphi/\partial t = R \cdot \omega \cdot \cos(\Phi) \cdot \sin(\lambda - \Lambda) \quad (1)$$

$$\partial\lambda/\partial t = R \cdot \omega \cdot [\sin(\Phi) - \cos(\lambda - \Lambda) \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \cdot \cos(\Phi)],$$

где Φ , Λ , ω – координаты полюса вращения плиты и ее скорость, R – радиус Земли.

Используя соотношения (1) и составив систему уравнений, можно получить параметры полюса

вращения. Нами для анализа использована модель AR-IR-2006 (табл. 1). Использование данных, полученных на западном и восточном флангах Амурской плиты, позволяет более точно оценить положение полюса Эйлера. Результаты определения параметров вращения Амурской плиты были уточнены с использованием данных, полученных до 2008 г. на Дальнем Востоке (Сихотэ-Алинский профиль) и в Забайкалье [6, 30, 61]. Результаты анализа данных по отдельным станциям Сихотэ-Алинского профиля (базовая станция Змейка, код станции – ZMEY и станция профиля Большая Уссурка, код станции – BURS) показаны на рисунке 1 а, б. Станции профиля заложены в коренных скальных породах. Только на базовой станции (ZMEY) бетонный постамент площадью 0.5 м^2 и глубиной 2.7 м расположен в осадочных породах (глины, алевролиты). Для исключения сезонного влияния измерения проводились ежегодно в период с 15 сентября по 15 октября. В результате анализа получено положение полюса вращения плиты относительно Евразии: 57.0° N и 117.3° E ; $\omega = 0.088^\circ/\text{млн лет}$, что в пределах ошибки совпадает с нашим предыдущим определением [29].

Сводка определений параметров вращения Амурской плиты по данным GPS измерений, сейсмологии и четвертичной геологии приведена в табл. 2. Ошибка определения широты у разных авторов колеблется от 0.5° до 6° (по GPS определениям до 2°), ошибка долготы – от 0.7° до 33° (по GPS определениям до 4°), ошибка скорости – до 0.100 град./млн лет (по GPS определениям – до 0.02 град./млн лет). Искажение и разброс результатов анализа сейсмологических данных вызваны редкостью сейсмологической сети станций и слабой изученностью строения земной коры. Отметим, что по данным GPS наблюдений получена очень малая величина векторов смещения Амурской плиты относительно Евразийской ($1\text{--}3$ мм в год). Наличие разломов в восточной части плиты, например, Тан-Лу и Центрального Сихотэ-Алинского, может исказить результат. В зонах разломов, по оценкам разных авторов, влияние может дости-

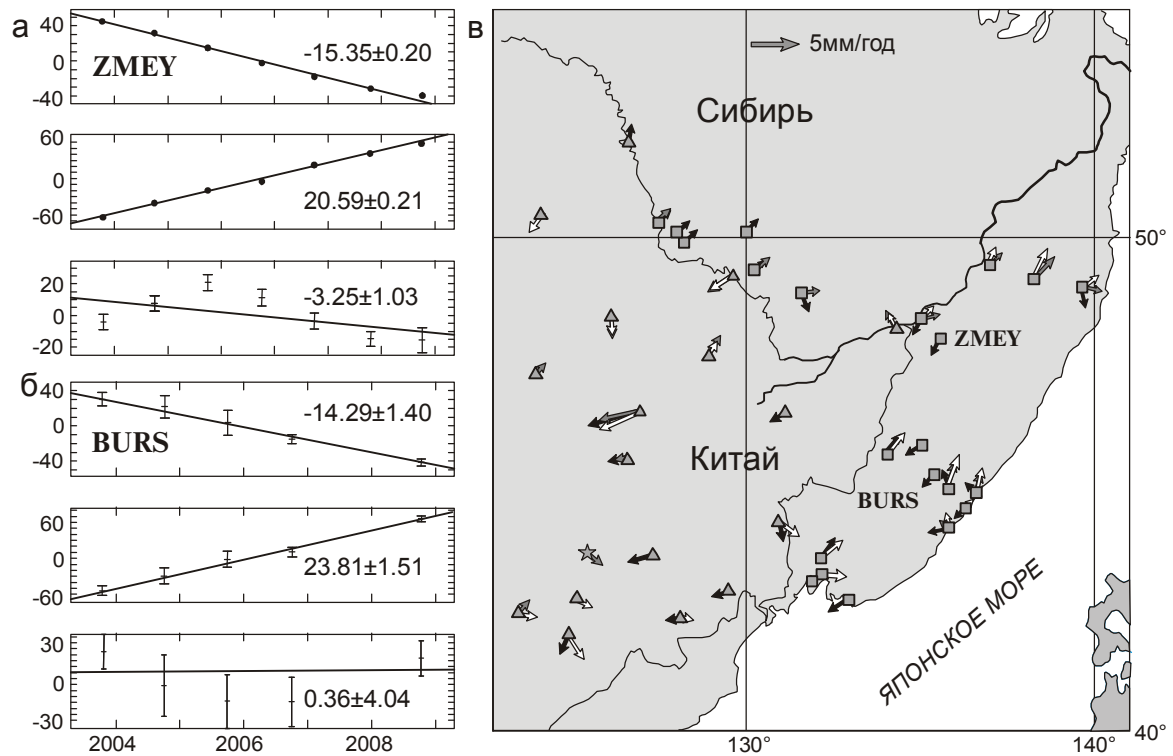


Рис. 1. а – Результаты анализа данных по базовой станции Змейка (код станции ZMEY) дальневосточной сети с 2003 по 2009 гг. Смещение пункта в мм в системе географических координат, сверху вниз смещение: на север, на восток и по радиусу Земли. б – Решение для станции Большая Уссурка (BURS) Сихотэ-Алинского профиля, обозначения те же. в – Проверка моделей (табл. 2). Остаточные значения векторов смещений (в мм в год) на восточной части Амурской плиты для различных моделей: [62] – серая стрелка; [29] – черная; 2010 [59] – белая.

гать 5 мм в год. Для оценки моделей движения плит используются методы статистических оценок, метод оценки остаточных векторов (рис. 1 в) либо для зоны растяжения – расчет скорости раздвижения впадины озера Байкал [1]. В последнем случае экспериментальные скорости раздвижения (до 3 мм в год) [15, 28] позволяют разделить модели (табл. 2). В результате, наиболее вероятное положение полюса вращения Амурской плиты лежит в диапазоне: по широте – от 57°N до 60°N ; по долготе – от 117°E до 123°E . Для скорости вращения плиты наиболее правдоподобен разброс оценок от 0.07 до 0.10 град./млн лет.

Отметим один важный эффект, вытекающий из различного положения полюса вращения (табл. 2). При смещении полюса к западу появляется изменение скорости раскрытия впадины озера Байкал, а регистрируя это изменение вдоль озера Байкал с юга на север, можно уточнить модели. Моделирование позволяет оценить изменение скорости (модель 2, табл. 2), при этом значение вектора скорости с юга на север озера изменяется от 1.6 мм/год ($V_n = -1.26$,

$V_e = 1.04$; 51.6°N и 103.6°E) до 0.6 мм/год ($V_n = -0.58$, $V_e = 0.20$; 56.0°N и 111.0°E).

Из модельного представления о вращении Амурской плиты следует наличие зон современного растяжения и сжатия соответственно на западной и восточной ее границах, где должны происходить землетрясения сбросового и надвигового типа. Это можно проиллюстрировать на примере двух недавних землетрясений, при изучении которых использованы данные о смещениях, полученные современными методами радарной съемки и GPS геодезии. На востоке в зоне сжатия – это Невельское землетрясение надвигового типа ($M = 6.2$, 2 августа 2007 г.) [7]. В зоне растяжения на западе – это Култукское землетрясение сбросового типа ($M = 6.3$, 27 августа 2008 г.). В обоих случаях характерно наличие значительной вертикальной компоненты в косейсмических движениях. Смещения перед Култукским землетрясением, по результатам анализов данных станции Талая (юго-западный берег озера Байкал, координаты 51.64°N и 103.68°E , в международной системе сейсмологи-

Таблица 2. Параметры современного вращения Амурской плиты (положение полюса Эйлера) по данным космической геодезии, сейсмологии и четвертичной геологии.

№	Источник	Широта в градусах	Долгота в градусах	Скорость вращения град./млн лет
1	Wei and Seno, 1998 [62]	60.42	123.25	0.025
2	Тимофеев и др., 2008 [29]	57.60	117.10	0.083
	Настоящая работа	57.0	117.3	0.088
3	Ашурков и др., 2010 [1]	58.95	122.28	0.095
4	Calais et al., 2006 [38]	57.40	133.00	0.077
5	Shestakov et al., 2008 [58]	59.77	150.82	0.037
6	Zonenshain and Savostin, 1981 [64]	56.95	117.45	0.100
7	Hsu et al., 2006 [47]	60.65	121.72	0.102
8	Парфенов и др., 1987 [25]	57.90	118.02	0.410
9	Meng et al., 2006 [53]	54.06	135.87	0.099
10	Kreemer et al., 2003 [52]	58.80	157.50	0.034
11	Apel et al., 2006 [33]	51.63	148.35	0.063
12	Calais et al., 2003 [37]	58.36	130.97	0.143
13	England and Molnar, 1997 [43]	64.80	156.10	0.060
14	Jin et al., 2007 [49]	50.46	153.42	0.056
15	Kreemer et al., 2006 [51]	46.41	150.07	0.055
16	Altamimi et al., 2007 [34]	19.42	185.64	0.019
17	Holt et al., 2000 [46]	64.61	158.23	0.077
18	Prawirodirdjo and Book, 2004 [56]	45.43	154.75	0.093
19	Sella et al., 2002 [57]	44.18	158.76	0.107
20	Heki et al., 1999 [45]	-22.30	106.60	-0.091

ческих станций, код TLY), за период 2000–2008 гг. составили: $V_n = 0.2 \div 0.3$ мм/год (на юг), $V_e = 0.8 \div 1.5$ мм/год (на восток), $V_h = -(1.5 \div 2.2)$ мм/год (опускание). Для вертикальной скорости выделяются два периода со скоростями: $V_h = -2.5$ мм/год (опускание с 2000 по 2004 год) и $V_h = 0$ мм/год (2005–2008 гг.). Полученные скорости горизонтальных смещений соответствуют модельным представлениям (модель 2, табл. 2) и результатам, полученным за период 1994–2007 гг. для близлежащих станций Слюдянка и Култук [16, 17, 27, 28]. Отметим, что иркутскими коллегами в 2004 г. была показана эквивалентность горизонтальных скоростей по обе стороны Главного Саянского разлома в этом районе, что говорит о накоплении деформаций в окрестностях разлома и о возможности землетрясения с магнитудой $7.1 \div 7.5$ [27]. Землетрясение с магнитудой 6.3 по Рихтеру в этом районе случилось 27 августа 2008 г. В 3D смещениях пункта Талая для эпохи ноябрь 2008–2009, 2010 гг. хорошо проявился косейсмический эффект Култукского землетрясения (рис. 2 б и в), скачок смещений до – 15 мм.

Далее обратимся к модельным представлениям о вращении тектонических плит и о характере смещений в их обрамлении в более древние геологические эпохи.

ВРАЩЕНИЕ СИБИРСКОГО ТЕКТОНИЧЕСКОГО ДОМЕНА И ВНУТРИПЛИТНЫЕ СДВИГОВЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ (ПО ПАЛЕОМАГНИТНЫМ ДАННЫМ)

Несомненный интерес представляет сравнение мгновенного полюса вращения Сибирской платформенной области относительно ее южного складчатого обрамления (в данном случае Амурской плиты) с полюсами вращения, рассчитанными по палеомагнитным данным для мезозойского интервала.

Сама идея о повороте Сибирского кратона относительно его складчатого обрамления в течение мезозоя является далеко не новой. Эта гипотеза была высказана П.С. Вороновым еще в 1959 г. Он установил, что целый ряд сдвиговых нарушений как в пределах Сибирской платформы, так и на ее периферии образуют картину, которая соответствует повороту платформы по часовой стрелке [8]. Позднее появились геофизические подтверждения такого поворота. А.Н. Храмов с соавторами на основе анализа палеомагнитных данных по позднему палеозою–раннему мезозою установил наличие дифференциальных поворотов Сибирской платформы по отношению к фрагментам ее западного и южного складчатого обрамления [9, 26].

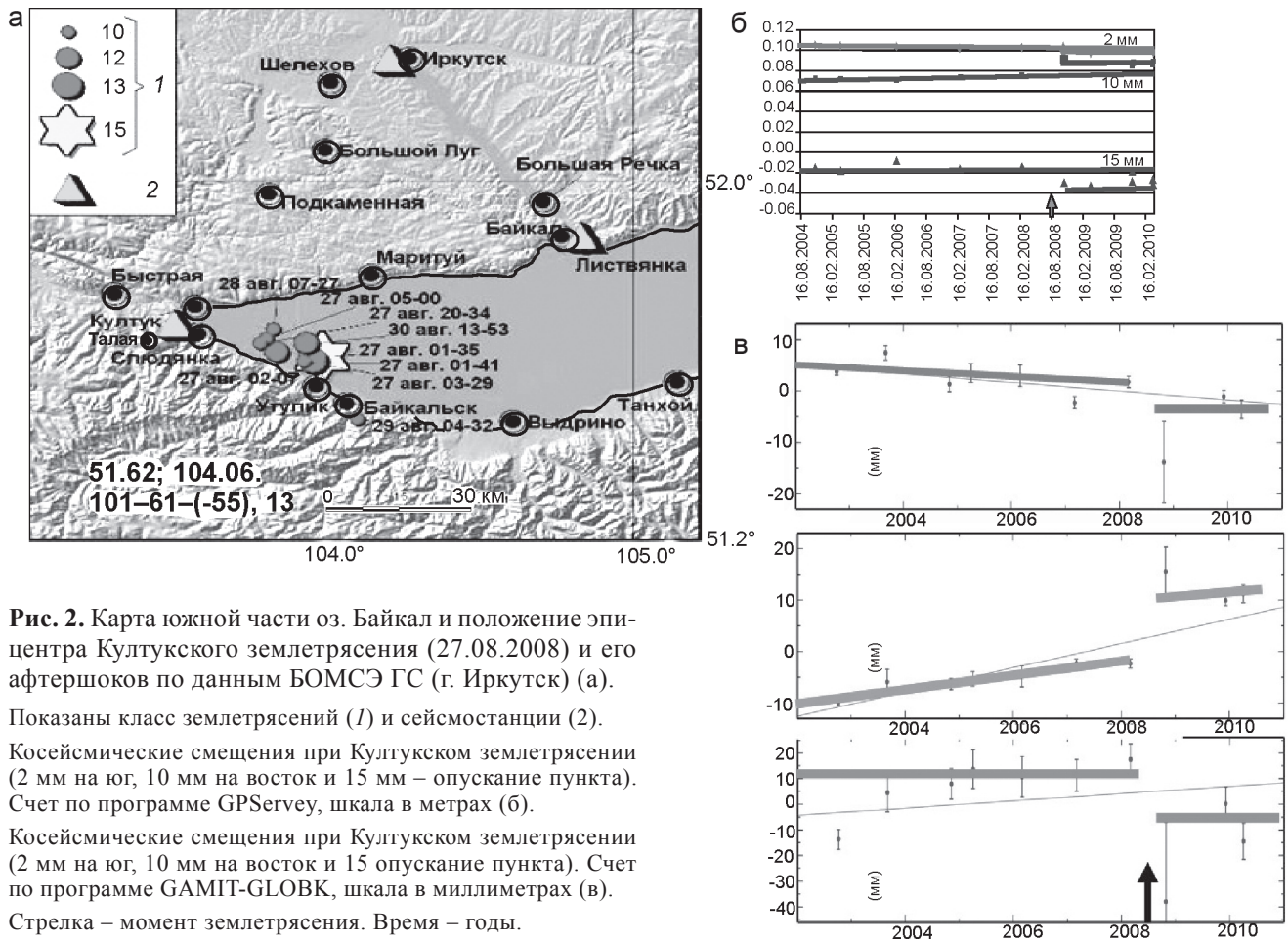


Рис. 2. Карта южной части оз. Байкал и положение эпицентра Култукского землетрясения (27.08.2008) и его афтершоков по данным БОМСЭ ГС (г. Иркутск) (а).

Показаны класс землетрясений (1) и сейсмостанции (2).

Косейсмические смещения при Култукском землетрясении (2 мм на юг, 10 мм на восток и 15 мм – опускание пункта). Счет по программе GPSSurvey, шкала в метрах (б).

Косейсмические смещения при Култукском землетрясении (2 мм на юг, 10 мм на восток и 15 мм опускание пункта). Счет по программе GAMIT-GLOBK, шкала в миллиметрах (в).

Стрелка – момент землетрясения. Время – годы.

Опубликованный М.Л. Баженовым и А.А. Моссаковским [2] анализ положения пермотриасовых палеомагнитных полюсов Сибирской и Восточно-Европейской платформ также выявил их значимое расхождение (не менее 10°), что позволило обоснованно утверждать реалистичность послераннетриасовых сдвиговых движений между платформами. Поворотом Сибирской платформы относительно Восточно-Европейской, по мнению авторов [2], может быть лучше всего объяснено размещение раннетриасовых структур сжатия и растяжения в Центральной Азии, при этом положение полюса вращения соответствует центральной части Сибирской платформы.

К аналогичному выводу пришел Л.П. Зоненшайн с соавторами [12]. Их независимая оценка поворота Сибирской платформы в составе Евразийской плиты в мезозое основана на закономерностях изменения возраста и места проявления внутриплитного магматизма на юге Сибири. Исходя из предложенных расчетов, полюс вращения также должен находиться

вблизи центра платформы, а поворот вокруг него в течение мезозоя составил до 75° [12]. Развитие идея получила в работе Г.Л. Митрофанова и А.П. Таскина [24], в которой приведены дополнительные геофизические, петрологические и геологические подтверждения поворота платформы.

Современные палеомагнитные данные подтверждают реальность поворота Сибирской платформы относительно ее западного обрамления в послепермское время и в целом Сибирского домена внутри Евразийской плиты (относительно Европейской части плиты) в течение почти всего мезозоя [54]. Под термином “домен” в данном случае понимается область, имеющая внутреннюю гетерогенную структуру, но выступающая в качестве тектонически жесткого блока коры. Под тектонической жесткостью понимается отсутствие масштабных деформаций, приведших к взаимным перемещениям или существенным поворотам блоков, составляющих внутреннюю структуру домена. В данном случае Сибирский домен включает Сибирский кратон

и складчато-покровные структуры обрамления: на юге – до Монголо-Охотской сутуры, на юго-западе – до Иртыш-Зайсанской сдвиговой зоны, разграничивающей каледонское основание Казахского составного террейна (домена) и Алтае-Саянской области, на западе за границу домена принят восточный борт Колтогорско-Уренгойской системы грабенов.

Ключевые позднемезозойские палеомагнитные полюсы для территории Сибирского домена представлены в табл. 3. Они составляют основу рассчитанной кривой кажущегося движения палеомагнитного полюса (ТКДП) Сибири для мезозойского интервала [54]. При расчете использован метод скользящего среднего, принятый также при построении синтетической кривой ТКДП Евразии [35]. Использование сферического сплайна (как второго основного метода построения кривых КДП) для сглаживания имеющихся данных дает аналогичный результат.

Позднемезозойская траектория КДП Сибири [54] в сравнении с референтной ТКДП Евразии (Европы) [35] и данными по Азиатской части плиты (Северо-Китайский блок) [44, 48, 63] показана на рис. 3.

Очевидно, что тренд КДП Сибирского домена в целом повторяет ТКДП Европы. Характерным явля-

ется смещение полюсов в западном направлении в течение юрского времени, затем резкий поворот и общий дрейф на север в течение мела, что, несомненно, является отражением общности в тектонике этих крупных фрагментов Евразийской плиты в мезозое. Судя по восстановленному палеомагнитному следу, Сибирский тектонический домен в составе Евразийской плиты в юрское время, находясь в высоких широтах северного полушария, испытывал общий незначительный дрейф южного направления (максимальная скорость в середине юры могла составлять 10–12 см/год) с постепенным поворотом по часовой стрелке (со скоростью до 2.5 град./млн лет).

К рубежу юра-мел Сибирь достигает своих современных координат и далее в основном испытывает только вращение по часовой стрелке со скоростью не более 0.5–1 град./млн лет. Однако налицо существенные отличия в положении одновозрастных полюсов Сибири и Европы. В целом, допоздне-меловые полюсы Сибири развернуты относительно Европейских к югу-юго-востоку. Причем угол, на который отличается положение соответствующих полюсов Сибири и Европы, постепенно уменьшается с юры до конца мела (рис. 3). Такое систематическое отклонение указывает на наличие масш-

Таблица 3. Ключевые палеомагнитные полюсы для позднего мезозоя Сибири, использованные при построении ТКДП.

Объект	Возраст, млн лет	n	Тест	Палеомагнитный полюс				Источник
				Plat	Plong	A ₉₅	T	
Трубки взрыва и дайки Минусинского прогиба	74–82	16/243	Rb, C+	82.8	188.5	6.1	75	Метелкин и др., 2007 [21]
Вулканогенно-осадочные комплексы Забайкалья (хилокская свита)	110–130	25/193	Rb, F+, G*+	72.3	186.4	6.0	120	Метелкин и др., 2004 [20]
Осадочные серии Приверхоянского прогиба	140–120	11/93	F+	67.2	183.8	7.8	135	Метелкин и др., 2008 [22]
Вулканогенные комплексы Забайкалья (ичетуйская свита)	150–160	18/156	Rc, F+, G*+	63.6	166.8	8.5	155	Метелкин и др., 2007 [21]
Вулканогенно-осадочные комплексы Забайкалья (бадинская свита)	150–160	12/86	Ro, F+	64.4	161.0	7.0	155	Kravchinsky et al., 2002 [50]
Осадочные серии Приверхоянского прогиба	170–160	4/40	F+	59.3	139.2	5.7	165	Метелкин и др., 2008 [22]
Осадочные серии бассейна р. Лены	175–245	?/26	-	47.0	129.0	9.0	200	*Pisarevsky, 1982

Примечание. n – количество объектов, образцов использованных в определении полюса; тест – палеомагнитный тест: R – тест обращения, где индексы “b” и “c” соответствуют классификации [McFaden, McElchinnny, 1990], индекс “o” – означает неопределенный результат теста, F+ – положительный тест складки, C+ – положительный тест отжига, G*+ – положительный тест конгломератов (внутриформационные конгломераты); палеомагнитный полюс: Plat, Plong – соответственно, географические широта (в градусах с.ш.) и долгота (в градусах в.д.) полюса, A₉₅ – радиус 95% овала доверия, T – принимаемый для полюса возраст в млн лет. * – Определение #4417 из базы IAGA GPMД принято условно, подтверждается данными по раннеюрским базальтам Тугнуйской впадины [39].

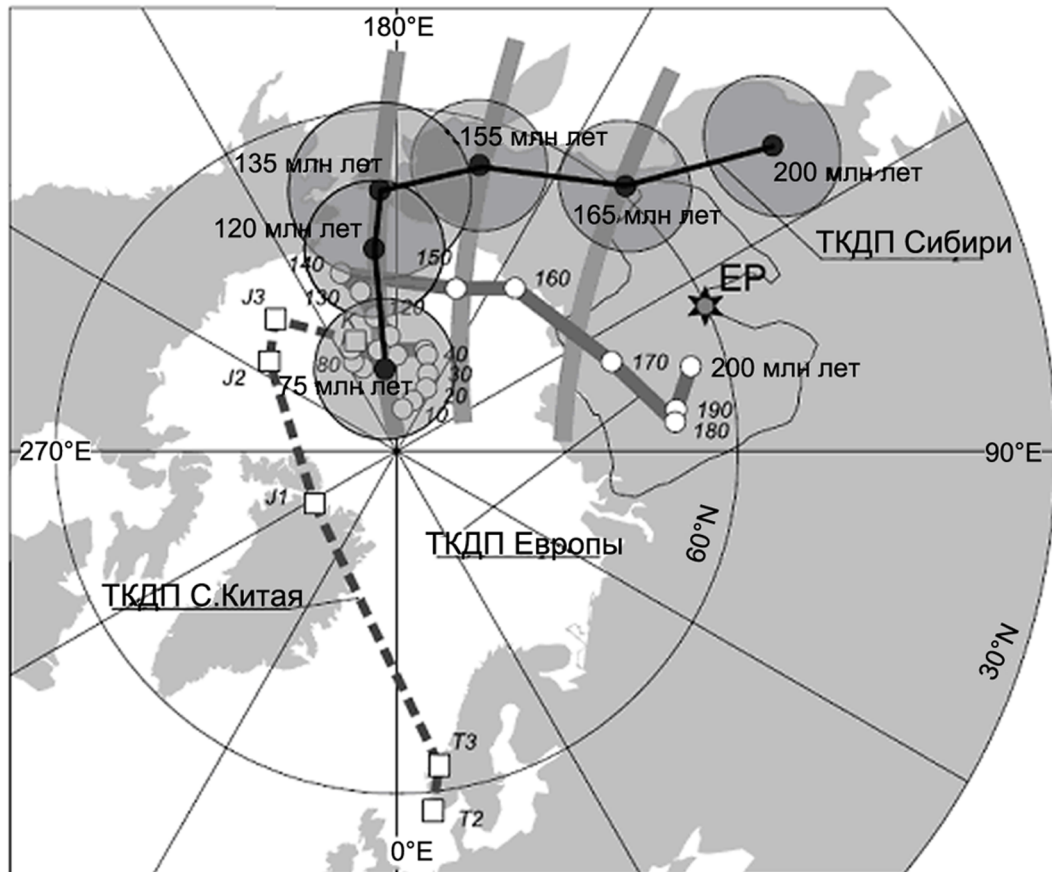


Рис. 3. Положение средних палеомагнитных полюсов для позднего мезозоя Сибирского региона (ТКДП Сибири) в сравнении с референтными ТКДП Европейского региона, [34] и Северного Китая по [43], [49].

Жирными серыми линиями показаны дуги малых кругов с центром 60° с.ш. 115° в.д. (Евразийский полюс EP), поворотом вокруг которого достигается совпадение соответствующих полюсов Сибири и Европы. Цифры и символы у полюсов обозначают принятый возраст полюса, овалы показывают 95 % область доверия для соответствующего полюса.

табных внутриплитных Евразийских сдвиговых перемещений ансамбля сибирских структур относительно европейских, кинематика которых может быть описана относительным “поворотом” Сибирского домена относительно Европейского по часовой стрелке. Для оценки масштабов сдвиговых перемещений необходимо рассчитать полюс Эйлера – точку, поворотом вокруг которой достигается наилучшее совпадение “одновозрастных” групп полюсов. Такое решение, в общем случае, не будет однозначным, поскольку любое движение на сфере можно описать вращением вокруг различных полюсов Эйлера. Чтобы исключить неоднозначность, мы, вслед за Л.П. Зоненшайном, приняли предположение о том, что полюс вращения должен находиться внутри Сибирской платформы и направление вращения соответствует повороту по часовой стрелке [12]. Если установленное отклонение полюсов является систематическим и обусловлено одним и тем же на-

бором тектонических и геодинамических факторов, положение полюса вращения плиты в рамках принятых предположений не должно сильно изменяться в течение реконструируемого интервала позднего мезозоя. Полюс Эйлера, соответствующий этим условиям, находится в точке с координатами 60° с.ш., 115° в.д., что с точностью до 10° – 15° согласуется с полюсами вращения, определенными другими авторами на основе сопоставления различных геолого-геофизических данных (табл. 4).

Следует оговориться, что координаты полюсов Эйлера, полученные по палеомагнитным данным, даны в относительной, а не абсолютной системе координат, тогда как для GPS определений эти две системы координат совпадают. Это позволяет корректно сравнивать положение полюсов вращения в относительной системе. Доверительные интервалы определения палеомагнитных полюсов, как правило, составляют 5 – 10° , поэтому, в пределах ошибки

Таблица 4. Координаты полюсов вращения Сибирского домена Евразийской плиты

Автор	Ф° с.ш.	Л° в.д.	Референтный блок	Время поворота, млн лет	Метод определения
Зоненшайн и др. [12]	54	104	Южное обрамление	250–130	Миграция магматизма
Храмов и др. [26]	65	110	Западное и южное обрамление	~250–0	Палеомагнитный
Казанский [13]	65	117	Западное обрамление	~250–0	Палеомагнитный
Метелкин и др. [21]	60	115	Европейский домен	165–75	Палеомагнитный
Наст. работа.	57.0	117.3	Амурская плита	0	GPS

определения, все полюсы имеют хорошую сходимость между собой, в том числе рассчитанный по результатам GPS наблюдений. Интересным является тот факт, что мезозойский полюс вращения практически не отличается от палеозойского [13, 20, 26]. Не исключено, что заданное Сибирской плите еще в раннем палеозое вращение в своей главной части сохраняется вплоть до конца мезозоя. Совмещение средне-позднеюрских полюсов с ТКДП Европы достигается поворотом на 45° (для 165 млн лет) и 28° (для 155 млн лет), а раннемеловых – на 17° (для 135 млн лет) и 12° (для 120 млн лет). Средняя угловая скорость поворота не превышала 0.7 град./млн лет. Совпадение позднемелового полюса (на 75 млн лет) с Европейской референтной кривой указывает, что масштабы активных тектонических процессов, связанных с внутриплитными сдвиговыми перемещениями между структурами Сибирского и Европейского доменов Евразийской континентальной плиты, находятся за пределами разрешающей способности палеомагнитного метода.

Таким образом, современный набор палеомагнитных данных по мезозою территории Сибири приводит к выводу о том, что структура Евразийской плиты в это время не была абсолютно жесткой [54]. Положение мезозойских палеомагнитных полюсов Сибири статистически значимо отличается от соответствующих по возрасту полюсов для территории Европы. В случае относительной жесткости структуры плиты “наблюдаемые” для Сибири палеомагнитные полюсы не должны были бы значимо отличаться от ожидаемого положения, рассчитанного из имеющейся последовательности полюсов Европы. В действительности мезозойские полюсы для территории Сибирского домена отличаются от ТКДП Европы, при этом расхождения имеют систематический характер. Различие в положении наблюдаемых палеомагнитных полюсов иллюстрирует постепенно угасающее вращение Сибирского домена относительно Европейского.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практически неизменное положение полюса вращения Сибирской платформы относительно структур ее складчатого обрамления в относительной системе координат свидетельствует о постоянстве вращения Сибирского домена в структуре Евразийской плиты. По-видимому, вращение этого тектонического элемента по часовой стрелке, фиксируемое с конца палеозоя, является глобальным процессом, связанным с общепланетарным движением плит. Кроме того, наблюдается общее замедление этого процесса. В результате, с конца мелового периода поворот уже не фиксируется палеомагнитным методом в силу того, что его величина выходит за пределы разрешающей способности метода, а мгновенная скорость вращения, по данным GPS, по крайней мере, в 10 раз меньше таковой для мезозойского времени.

Сдвиговые перемещения Сибирского домена внутри Евразийской плиты, обусловленные поворотом по часовой стрелке, в силу конфигурации основных тектонических границ определили устойчивый режим сжатия в пределах Центрально-Азиатской провинции (юго-западное обрамление Сибирского кратона) и, напротив, режим растяжения в пределах севера Западно-Сибирской провинции. Перемещения, вероятно, имели дискретный характер, что проявляется в реконструируемой многоэтапности главных эпох орогении [4, 5, 40], приуроченности сдвигов и других структурных форм, нарушающих первоначальную целостность мезозойского осадочного комплекса Западной Сибири, к определенным временным рубежам [3, 11, 14, 31, 32]. Современные данные сейсмического 3D-моделирования сегодня позволяют распознавать деформационные структуры в дочетвертичных отложениях региона, определенно обусловленные сдвигами по домезозойскому фундаменту, которые, в основном, приурочены к Колтогорско-Уренгойской системе грабен-рифтов [15].

Следует отметить сходство исходных понятий и подходов GPS и палеомагнитных методов. Это понятие недеформируемой плиты или домена, относительная система при вычислениях, статистические оценки результатов. Важно, что для различных геологических эпох получено сходное положение полюса относительного вращения Сибирского домена, при этом скорости от мезозоя к современному этапу уменьшаются почти на порядок. Можно надеяться, что дальнейшее развитие методов и сетей GPS наблюдений позволит уточнить полученные оценки параметров.

Работа выполнена при поддержке гранта Президиума РАН №16, проекты № 3 и №8; ОНЗ 6-2; интеграционных проектов СО РАН №№ 27, 87, 116.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др. Кинематика Амурской плиты по данным GPS геодезии // Геология и геофизика. 2011. № 2. С. 299–311.
2. Баженов М.Л., Моссаковский А.А. Горизонтальные перемещения Сибирской платформы в триасе по палеомагнитным и геологическим данным // Геотектоника. 1986. № 1. С. 59–69.
3. Беляков С.Л., Бондаренко Г.Е., Иванюк В.В., Смирнов А.В. Новые данные о позднемезозойских сдвиговых деформациях чехла северной части Западно-Сибирской плиты // Докл. РАН. 2000. Т. 372 (4). С. 510–513.
4. Буслов М.М., Ватанабе Т., Смирнова Л.В. и др. Роль сдвигов в позднепалеозойско-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей // Геология и геофизика. 2003, Т. 44 (1–2). С. 49–75.
5. Буслов М.М., Кох Д.А., де Граве И. Мезозойско-кайнозойская тектоника и геодинамика Алтая, Тянь-Шаня и Северного Казахстана по результатам трекового датирования апагитов // Геология и геофизика. 2008. Т. 49 (9). С. 862–870.
6. Быков В.Г., Бормотов В.А., Коковкин А.А. и др. Начало формирования единой сети геодинамических наблюдений ДВО РАН // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 4. С. 83–93.
7. Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Кин Ч.У., Такахаша Х. Кососейсмические деформации земной поверхности на о. Сахалин в результате Невельского землетрясения 02.08.2007 // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 5. С. 6–22.
8. Воронов П.С. Тангенциальные региональные сдвиговые деформации земной коры на севере Средней Сибири // Инф. бюл. Ин-та геологии Арктики. Вып. 17. Л., 1959. С. 13–20.
9. Воронов П.С., Храмов А.Н. Поворот Сибирской платформы и ее сдвиговая тектоника // Сдвиговые тектонические перемещения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых. Л., 1988. С. 91–95.
10. Гатинский Ю.Г., Рундквист Д.В. Геодинамика Евразии – тектоника плит и тектоника блоков // Геотектоника. 2004. № 1. С. 3–20.
11. Глухманчук Е.Д. Проявление сдвиговых деформаций в чехле Западно-Сибирской плиты в связи с нефтегазоносностью баженовской свиты // Тектоника платформенных областей. Новосибирск: Наука, 1988. С. 121–125.
12. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 2. М.: Недра, 1990. 340 с.
13. Казанский А.Ю. Эволюция структур западного обрамления Сибирской платформы по палеомагнитным данным: Автореф. дис... д-ра. геол.-минер. наук. Новосибирск, 2002. 40 с.
14. Конторович В.А. Мезозойско-кайнозойская тектоника и нефтегазоносность Западной Сибири // Геология и геофизика. 2009. Т. 50 (4). С. 461–474.
15. Короновский Н.В., Гогоненков Г.Н., Гончаров М.А. и др. Роль сдвига вдоль горизонтальной плоскости при формировании структур “пропеллерного” типа // Геотектоника. 2009. № 5. С. 50–64.
16. 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 гг. // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 2 / Отв. ред. К.Г. Леви и С.И. Шерман. Иркутск: Ин-т земной коры СО РАН, 2005. С. 26–38.
17. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным измерений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 7. С. 1006–1017.
18. 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.
19. Метелкин Д.В., Гордиенко И.В., Жао Х., Климук В.С. Раннемеловая геодинамика Забайкалья: палеомагнитный аспект // Докл. РАН. 2003. Т. 393 (4). С. 515–520.
20. Метелкин Д.В., Гордиенко И.В., Жао Х. Палеомагнетизм нижнемеловых вулканитов Забайкалья: свидетельство в пользу мезозойских сдвиговых перемещений в структуре Центральной Азии // Геология и геофизика. 2004. Т. 45 (12). С. 1404–1417.
21. Метелкин Д.В., Гордиенко И.В., Климук В.С. Палеомагнетизм верхнеюрских базальтов Забайкалья: новые данные о времени закрытия Монголо-Охотского океана и мезозойской внутриплитной тектонике Центральной Азии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48 (10). С. 1061–1073.
22. Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю. и др. Мезозойский интервал траектории кажущегося движения полюса Сибирского домена Евразийской плиты // Докл. РАН. 2008. Т. 418, № 4. С. 500–505.
23. Метелкин Д.В. Эволюция структур Центральной Азии и роль сдвиговой тектоники по палеомагнитным данным: Автореф. дис... д-ра геол.-минер. наук. Новосибирск, 2010. 36 с.
24. Митрофанов Г.Л., Таскин А.П. Структурные соотношения Сибирской платформы со складчатым окружением // Геотектоника. 1994. № 1. С. 3–15.
25. Парфенов Л.М., Козьмин Б.М., Имаев В.С., Савостин Л.А. Тектоническая природа Олекмо-Становой сейсмической зоны // Геотектоника. 1987. № 6. С. 94–108.
26. Роль сдвиговой тектоники в структуре литосфер Земли и планет земной группы. СПб.: Наука, 1997. 591 с.

27. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. и др. Растяжение в Байкальском рифте: Современная кинематика пассивного рифтогенеза // Докл. РАН. 2009. Т. 424, № 5. С. 664–668.
28. Саньков В.А., Чипизубов А.В., Лухнев А.В. и др. Подход к оценке опасности сильного землетрясения в зоне Главного Саянского разлома по данным GPS геодезии и палеосейсмологии // Геология и геофизика. 2004. Т. 45 (11). С. 1369–1376.
29. Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Ардюков Д.Г. и др. Результаты анализа данных GPS измерений (2003–2006 гг.) на Дальнем Востоке по Сихотэ-Алиньской сети // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 4. С. 39–49.
30. Тимофеев В.Ю., Горнов П.Ю., Ардюков Д.Г. и др. Моделирование плитных движений (на примере Амурской плиты) // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: Докл. науч. симпоз. Хабаровск: ИТиГ ДВО, 2010. С. 65–67. ISBN 978-5-7442-1491-3.
31. Филиппович Ю.В. Новая концепция тектонического строения фундамента и осадочного чехла Западно-Сибирской плиты // Геология нефти и газа. 2001. № 5. С. 51–62.
32. Чиков Б.М. Региональная деформированность мезозоя внутренних районов Западно-Сибирской плиты (сейсмоструктурный анализ) // Геология нефти и газа. 2000. № 2. С. 32–37.
33. Apel E.V., Burgmann R., Steblov G. et al. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modelling // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33, N 11. L11303, doi: 10.1029/2006GL026077.
34. Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J. et al. ITRF 2005: 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, N B9. B09401, doi: 10.1029/2007/JB004949.
35. Besse J., Courtillot V. Apparent and true polar wander and geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N B11. P. 1–31.
36. Boucher C., Altamimi Z., Sillard P., Feissel-Vernier M. The ITRF 2000 // IERS Technical Note. 2001. N. 31. 270 p.
37. 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 Geophys. Res. 2003. V. 108, B10. P. 2501.
38. Calais E., Dong L., Wang M. et al. Continental deformation in Asia from a combined GPS solution // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33, N 24. L24319, doi: 10.1029/2006GL028433.
39. Cogné J.-P., Kravchinsky, V.A., Halim N., Hankard F. Late Jurassic – Early Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean demonstrated by new Mesozoic palaeomagnetic results from the Trans-Baikal area (SE Siberia) // Geophys. J. Int. 2005. V. 163. P. 813–832.
40. De Grave J., Buslov M.M., Van den Haute P. Distant effects of India-Eurasia convergence and Mesozoic intracontinental deformation in Central Asia: Constraints from apatite fission-track thermochronology // J. Asian Earth Sci. 2007. V. 29. P. 194–213.
41. De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions // Geophys. J. Int. 1990. V. 101. P. 315–353.
42. De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F. et al. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21, N 20. P. 2191–2194.
43. England P.C., Molnar P. Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia // J. Geophys. Res. 2006. 110. B12401. doi:10.1029/2004JB003541.
44. Gilder S., Courtillot V. Timing of North-South China collision from new middle to Late Mesozoic paleomagnetic data from the North China Block // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 17, 713–17,727.
45. Heki K., Shin'ichi M., Hiroaki T. et al. The Amurian Plate motion and current plate kinematics in eastern Asia // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N B12. P. 147–155. DECEMBER 10.
46. Holt W.E., Chamot-Rooke N. et al. Velocity field in Asia inferred from Quaternary fault slip rate and global positioning system observations // J. Geophys. Res. 2000. 105 (B8). P. 19185–19209.
47. Hsu Houtze, Pil-Ho Park, Teruyuki Kato et al. Amurian – A Nassium 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, 2006, ICC Jeju, Jeju, Korea. P. 50.
48. Huang B.C., Zhou Y.X., Zhu R.X. Paleomagnetic Discussions on the Phanerozoic Evolution and Formation of Chinese Continent // Earth Science Frontiers. 2008. V. 15(3). P. 348–359.
49. 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.
50. Kravchinsky V.A., Cogné J.-P., Harbert W.P., Kuzmin M.I. Evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean as constrained by new palaeomagnetic data from the Mongol-Okhotsk suture zone, Siberia // Geophys. J. Int. 2002. V. 148. P. 34–57.
51. Kreemer C., Lavallo'e, D.A., Blewitt, G. Holt W.E. On the stability of a geodetic no-net-rotation frame and its implication for the International Terrestrial Reference Frame // Geophys. Res. Lett. 2006. 33. L17306. doi:10.1029/2006GL027058.
52. Kreemer 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, N 1. P. 8–34.
53. Meng G., Shen, X. Wu J., Rogozhin E.A. Present-day crustal motion in northeast China determined from GPS measurements // Earth Planets Space. 2006. V. 56. P. 1441–1445.
54. Metelkin D.V., Vernikovskiy V.A., Kazansky A.Yu., Wingate M.T.D. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence // Gondwana Research. 2010. V. 18. P. 400–419.
55. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // Science. 1975. V. 189. P. 419–426.
56. Prawirodirdjo L., Bock Y. Instantaneous global plate motion model 12 years of continuous GPS observations // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, N B8. B084405. doi: 10.1029/2003JB002944
57. Sella G.F., Dixon T.H., Mao A. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N B4. 2081. doi: 10.1029/2000JB000033.

58. Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Kolomiets A.G. et al. 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 13-th Workshop of Asia-Pacific space geodynamics program: Abstract book. Novosibirsk, 2008. P. 16–17.
59. Shestakov N., Gerasimenko M., Kolomiets A.G. et al. Recent crustal movements of Russian Far East as seen from GPS observations // Program and Abstracts. APSG Workshop 2010 on Progress in Space Geodesy and Earth Environment Change. Shanghai, 2010. China. P. 22.
60. Stein S., Gordon R., Statistical tests of additional plate boundaries from plate motion inversions // Earth Planet. Sci. Lett. 1984. V. 69. P. 401–412.
61. Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Gornov P.Yu., Boyko E.V. Sikhote-Alin GPS profile results and Amur plate motion // APSG 2008, PROCEEDING OF THE APSG SYMPOSIUM: “Space Geodynamics and Modeling of the Global Geodynamic Processes” International scientific conference in the frames of the “Asian-Pacific Space Geodynamics” Project, Published by Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, 2009. ISBN 978-5-9747-0156-6. P. 14 – 21.
62. 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.
63. Yang Z.Y., Besse J. New Mesozoic apparent polar wander path for south China: Tectonic consequences // J. Geophys. Res. 2001. V.106. P. 8493–8520.
64. 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 А.Н. Диденко

V.Yu. Timofeev, A.Yu. Kazansky, D.G. Ardyukov, D.V. Metelkin, P.Yu. Gornov, N.V. Shestakov, E.V. Boiko, A.V. Timofeev, G.Z. Gil'manova

Rotation parameters of the Siberian domain and its eastern framing in different geologic epochs

The analysis of the motion of tectonic blocks of the Earth in the junction area between the Eurasian plate and its surroundings has been made. The present-day stage is examined using space geodesy and seismology data. Different models of rigid plate movements for Eurasia are analyzed. The use of the model of Eurasia (northern part of Asia) is exemplified to determine rotation parameters of the Amur plate on the basis of GPS data for the Far East (Sikhote-Alin profile) and the Transbaikal region. The use of the model of the Amur plate is illustrated for the extension zone at its western boundary – the Baikal Lake depression in the epoch of the Kultuk earthquake (M = 6.3, 8/27/2008). Paleomagnetic data allowed us to determine the pole of rotation of the Siberian craton with respect to its fold framing during the Mesozoic from paleomagnetic evidence, and kinematic parameters were estimated. The constant position of the rotation pole in the relative coordinate system from the end of the Paleozoic to the Present testifies to the constancy of rotation of the Siberian domain in the structure of the Eurasian plate.

Key words: rotation of tectonic plates, present-day stage, Mesozoic, GPS method, paleomagnetic method, Siberian domain, Eurasian plate.