

ВРАЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В БАЙКАЛО-МОНГОЛЬСКОМ РЕГИОНЕ ПО ДАННЫМ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ

А.В. Лухнев, В.А. Саньков, А.И. Мирошниченко, С.В. Ашурков, Э. Кале*

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

** Purdue University, West Lafayette, USA*

Проведен анализ результатов измерений на пунктах сети Байкало-Монгольского геодинамического полигона за период с 1994 по 2007 г. Рассчитано поле скоростей современных горизонтальных движений земной поверхности для территории Прибайкалья, Западной и Центральной Монголии, Тувы. Вычислены скорости относительных деформаций и вращения для структурно обоснованной триангуляционной сети полигона.

В поле векторов скоростей горизонтальных движений выделяются два главных тренда — северо-восточный, локализованный в пределах Джунгарии, Монгольского Алтая и Долины Больших Озер, и юго-восточный, характерный для Хангая, восточной части Гобийского Алтая, Забайкальского блока Амурской плиты. Направление и скорости перемещения GPS-пунктов подтверждают движение Амурской плиты в юго-восточном направлении со скоростью около 2 мм·год⁻¹.

По величине и соотношению относительных деформаций выделены домены преимущественного сокращения и расширения. Первые наблюдаются в Гобийском и Монгольском Алтае, а также в районе хр. Хамар-Дабан. Магнитуда северо-восточного укорочения достигает $\epsilon_2 = (19.2 \pm 6.0) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Вторые выделяются в Байкальском и субмеридиональном — Бусийн-Гол—Западно-Хангайском доменах. В обоих случаях оси удлинения направлены на северо-запад, магнитуда удлинения достигает $\epsilon_1 = (22.2 \pm 3.1) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹.

Малыми значениями горизонтальных деформаций и неустойчивостью их по типу характеризуется восточная часть Хангайского свода и прилегающая с востока часть Гобийского пенепплена.

В пределах Орхон-Селенгинской депрессии (центральная и северная части Монголии) значения скоростей укорочения и удлинения приблизительно равны: $\epsilon_2 = (15.4 \pm 5.4) \cdot 10^{-9}$, $\epsilon_1 = (18.1 \pm 3.1) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Отклонения от общей тенденции ориентации осей и изменение типа деформаций наблюдаются вблизи эпицентральной зоны Могодского землетрясения 1967 г.

В пределах исследуемой территории наиболее распространенными являются вращения по часовой стрелке с малыми скоростями порядка $\Omega = 6 \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹. Высокие скорости вращения по часовой стрелке отмечаются для Хангайского домена — до $(18.1 \pm 5.2) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹, для Гобийского Алтая — $(10.4 \pm 7.5) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹, а также для Орхон-Селенгинского домена — до $(11.9 \pm 5.2) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹. Домен с вращением против часовой стрелки, где скорость составляет $\Omega = 3.7 \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹, выделяется на территории Западной Тувы, распространяясь на северо-западную часть Долины Больших Озер.

Вращения против часовой стрелки установлены по обеим сторонам Байкальского рифта — вдоль края Сибирской платформы и в пределах сопряженных с рифтом впадинах Забайкалья. Скорости вращения на данной территории достигают $(13.0 \pm 3.9) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹, тогда как в пределах Байкальской впадины не выходят за пределы ошибок измерения. Второй домен с вращением против часовой стрелки протягивается от Восточного Прихубсугуля до северных отрогов Хангая. Максимальные скорости вращения достигают здесь $(16.3 \pm 2.8) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹.

GPS, тектонические скорости, деформации земной коры, вращения, относительные деформации.

GPS ROTATION AND STRAIN RATES IN THE BAIKAL–MONGOLIA REGION

A.V. Likhnev, V.A. San'kov, A.I. Miroshnichenko, S.V. Ashurkov, and E. Calais

Current deformation in Pribaikalia, Western and Central Mongolia, and Tuva has been studied from measured horizontal GPS velocities and respective computed strain and rotation rates using 1994–2007 data of the Baikal–Mongolian GPS triangulation network.

The GPS velocity field shows two main trends: an NE trend within Jougaria, the Mongolian Altay, and the Great Lakes Valley and an SE trend in the Hangayn and eastern Gobi Altay mountains, and in the Transbaikalian block of the Amur plate. The velocity magnitudes and vectors are consistent with an SE motion of the Amur plate at a rate of ~2 mm/year.

The derived strain pattern includes domains of crustal contraction and extension recognized from the magnitudes of relative strains. Shortening predominates in the Gobi and Mongolian Altay and in the Khamar-Daban Range, where it is at $\epsilon_2 = (19.2 \pm 6.0) \cdot 10^{-9}$ yr⁻¹ being directed northeastward. Extension domains exist in the Baikal rift and in the Busiyngol–West Hangayn area, where the crust is stretching along NW axes at $\epsilon_1 = (22.2 \pm 3.1) \cdot 10^{-9}$ yr⁻¹. The eastern Hangayn dome and the Gobi penepplain on its eastern border show low and unstable strain rates. In central and northern Mongolia (Orhon–Selenge basin), shortening and extension are at

similar rates: $\varepsilon_2 = (15.4 \pm 5.4) \cdot 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$ and $\varepsilon_1 = (18.1 \pm 3.1) \cdot 10^{-9} \text{ yr}^{-1}$. The strain pattern changes notably in the area of the Mogod earthquake of 1967.

Most of rotation throughout Central Asia is clockwise at a low rate of about $\Omega = 6 \cdot 10^{-9} \text{ deg} \cdot \text{yr}^{-1}$. High rates of clockwise rotation are observed in the Hangayn domain $(18.1 \pm 5.2) \cdot 10^{-9} \text{ deg} \cdot \text{yr}^{-1}$, in the Gobi Altay $(10.4 \pm 7.5) \cdot 10^{-9} \text{ deg} \cdot \text{yr}^{-1}$, and in the Orhon–Selenge domain $(11.9 \pm 5.2) \cdot 10^{-9} \text{ deg} \cdot \text{yr}^{-1}$. Counterclockwise rotation is restricted to several domains. One is in western Tuva and northwestern Great Lakes Valley of Mongolia ($\Omega = 3.7 \cdot 10^{-9} \text{ deg} \cdot \text{yr}^{-1}$). Two more counterclockwise rotation regions occur on both flanks of the Baikal rift: along the craton edge and in basins of Transbaikalia on the rift eastern border, where rotation rates are as high as $(13.0 \pm 3.9) \cdot 10^{-9} \text{ deg} \cdot \text{yr}^{-1}$, while rotation within the Baikal basin does not exceed the measurement error. Another such domain extends from the eastern Hövsgöl area to the Hangayn northern foothills, with the counterclockwise rotation at a highest rate of $(16.3 \pm 2.8) \cdot 10^{-9} \text{ deg} \cdot \text{yr}^{-1}$.

GPS, GPS velocity, crustal deformation, rotation, strain rate

ВВЕДЕНИЕ

Тектоника плит позволяет охарактеризовать динамику движения тектонических структур направлением и скоростью. Современные методы спутниковой геодезии дают возможность в короткие сроки и с достаточной точностью не только определять направления и скорость движения, но и на основании этих характеристик рассчитать тектонические деформации на границах определяемых или смоделированных блоков земной коры.

Изучению тектонических деформаций сейсмоактивных районов Центральной Азии посвящены многие работы последних лет [Zonenshain, Savostin, 1981; DeMets et al., 1990; Avouac, Tapponnier, 1993; Argus, Heflin, 1995; England, Molnar, 1997; Heki et al., 1999; Larson, 1999; Wu et al., 2001; Li et al., 2002; Yang, Liu, 2002; Calais et al., 2003; Zhang et al., 2004]. Как правило, такие районы располагаются в зонах взаимодействия, как минимум, двух, а то и более тектонических плит. Скорости и направления современных тектонических деформаций структур Центральной Азии, в частности, на западной границе Амурской плиты до сих пор остаются не ясными [Wei, Seno, 1998; Heki et al., 1999; Wang et al., 2001., Calais et al., 2003, 2006; Apel et al., 2006; Jin et al., 2007]. Горизонтальные скорости перемещений GPS-пунктов Байкальского геодинамического полигона лежат в пределах первых миллиметров [Саньков и др., 1999, 2004; Лухнев и др., 2003].

Разнонаправленность и интенсивность движений блоков земной коры в пределах таких тектонических структур вызывают высокую сейсмичность, вулканическую деятельность и другие природные катаклизмы, приводящие к катастрофическим последствиям и зачастую к гибели людей. Потенциально опасными районами Центральной Азии являются территории северо-западной части Китая (Тянь-Шань), Монголии, а также районы Байкальской рифтовой зоны (БРЗ).

Проведение периодических и постоянных наблюдений на пунктах GPS-сети, организованной нами в данном регионе, позволяют оценить тектонические деформации в пределах Байкало-Монгольского региона.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ GPS

Начиная с 1994 г. в Байкальской рифтовой зоне, в 1997 г. на территории Монголии, а с 2000 г. в Туве и на юге Красноярского края организована сеть геодинамических пунктов, на которых проведены измерения методом GPS-геодезии. С целью исследования современных тектонических движений полевые геодезические марки устанавливались строго в монолитных коренных породах, не подверженных деформациям, путем цементирования стальных нержавеющей стержней длиной 12—15 см в предварительно пробуренные скважины.

На сегодняшний день насчитывается более 50 пунктов наблюдений, измерения на которых были проведены более четырех раз. Станции, расположенные в Иркутске (с 1995 г.) и Улан-Баторе (с 1999 г.), входящие в систему Международной GPS-службы (IGS), относятся к постоянным пунктам. Начиная с 2006 г. на базе сейсмических станций Байкальского филиала ГС СО РАН Закаменск (Западное Забайкалье) и Тьрган (Приольхонье) организованы полупостоянные пункты наблюдений.

На всех пунктах сети измерения производились двухчастотными GPS-приемниками спутникового сигнала типа Ashtech Z12 с использованием антенн Geodetic II и Geodetic III, на некоторых с 1998 г. использовались антенны Choke-Ring. Временной интервал ежегодных измерений составлял не менее трех дней, записи велись в течение 23 ч в сутки. На трех станциях, включенных в нашу региональную GPS-сеть (IRKT, ULAZ (ULAB), KSTU), наблюдения производились в постоянном режиме.

Анализ и расчет псевдодиапазонов и фазовых записей за каждый день измерений производились программным пакетом GAMIT [King, Bock, 2006]. Используя метод двойных разностей, мы получили

координаты региональных станций и их приращения, параметры движения спутников, 13 зенитных задержек для каждой станции и каждого дня измерений, а также фазовые неоднозначности. При получении решения использованы финальные орбиты спутников, представленные IGS [Beutler et al., 1993], параметры ориентации вращения Земли (IERS), таблицы зависимостей фазовых центров от азимута и угла прихода спутникового сигнала, таблицы параметров Солнца и Луны и другие материалы, рекомендованные Международной GPS-службой. Для уравнивания региональной и глобальной GPS-сетей привлечены данные по 19 IGS станциям (ARTU, CHUM, FAIR, GRAZ, IRKT, KIT3, KOKB, NRIL, NVSK, ONSA, POL2, SELE, TIDB, TSKB, ULAB, URUM, USUD, KSTU, TIXI) [Altamimi et al., 2002].

Поправочные коэффициенты положений станций и орбитальных параметров, рассчитанные за каждый независимый день измерений, и их вариационно-ковариационный матрицы были объединены с результатами, полученными для глобальных станций Институтом океанографии (г. Сан-Диего, США), и затем обработаны фильтром Кальмана (GLOBK) [Herring et al., 1990]. Проведено уравнивание региональной GPS-сети с сетью станций, относящихся к системе ITRF2000, и рассчитаны ориентация, трансформация и масштабная трансформация с использованием данных станций IGS, имеющих многолетний непрерывный период измерений.

ПОЛЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКОРОСТЕЙ ПО ДАННЫМ GPS

Исследуемая территория представлена широкой деформационной зоной на границе нескольких тектонических плит. Исходя из предположения, что Евразийская плита имеет значительную площадь и относительно менее подвержена современным тектоническим деформациям, расчеты поля скоростей

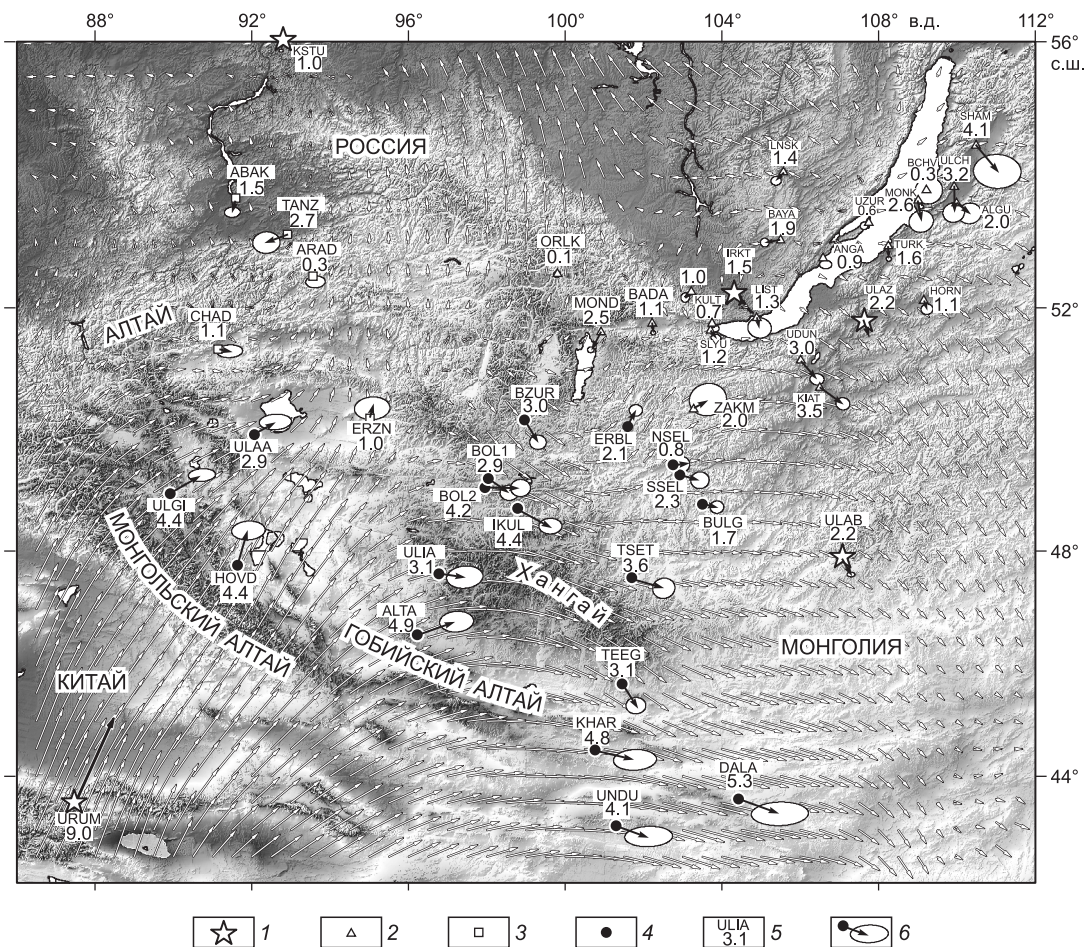


Рис. 1. Поле горизонтальных скоростей по данным GPS 1994—2007 гг. относительно Евразийской плиты в 95%-м доверительном интервале.

Белые стрелки — средние скорости на равномерной сетке $30' \times 30'$, черные — скорости GPS-пунктов, рассчитанные в данной работе. 1—4 — станции GPS: 1 — постоянных измерений, 2 — Байкальского полигона, 3 — Тувинского, 4 — Монгольского; 5 — аббревиатура станции и скорость ($\text{мм}\cdot\text{год}^{-1}$), 6 — направление и значение скорости в 95%-м доверительном интервале.

Таблица 1. Горизонтальные скорости GPS-станций Байкало-Монгольской геодинамической сети

| Координаты, град. | | Скорость, мм·год ⁻¹ | | Коэффициент корреляции | Станция | Вектор | |
|-------------------|--------|--------------------------------|------------|------------------------|---------|--------------------------------|---------------|
| в.д. | с.ш. | восточная | северная | | | скорость, мм·год ⁻¹ | азимут, град. |
| 110.483 | 54.496 | 2.62±1.19 | -3.27±0.85 | -0.029 | SHAM | 4.1 | 141.2 |
| 109.985 | 53.623 | 1.62±0.59 | -1.29±0.52 | 0.044 | ALGU | 2.0 | 128.5 |
| 109.936 | 53.872 | -0.09±0.54 | -3.21±0.49 | 0.048 | ULCH | 3.2 | 181.6 |
| 109.214 | 53.823 | 0.32±0.69 | -0.13±0.67 | 0.055 | BCHV | 0.3 | 112.1 |
| 109.153 | 52.121 | 0.40±0.30 | -1.12±0.26 | 0.042 | HORN | 1.1 | 160.3 |
| 109.010 | 53.666 | 0.38±0.61 | -2.62±0.55 | 0.065 | MONK | 2.6 | 171.7 |
| 108.243 | 52.970 | 0.09±0.13 | -1.64±0.12 | -0.015 | TURK | 1.6 | 176.8 |
| 107.743 | 53.325 | -0.53±0.20 | -0.41±0.19 | 0.027 | UZUR | 0.6 | 232.2 |
| 107.635 | 50.553 | 1.86±6.22 | -4.65±5.84 | -0.033 | KHIL | 5.0 | 158.1 |
| 107.622 | 51.815 | 0.74±0.06 | -2.09±0.04 | -0.045 | ULAZ | 2.2 | 160.5 |
| 107.052 | 47.865 | 1.17±0.20 | -1.90±0.12 | -0.017 | ULAB | 2.2 | 148.3 |
| 106.581 | 52.787 | 0.33±0.31 | -0.87±0.21 | -0.028 | ANGA | 0.9 | 159.2 |
| 106.494 | 50.737 | 2.85±0.35 | -2.07±0.31 | -0.051 | KIAT | 3.5 | 125.9 |
| 106.015 | 51.171 | 1.99±0.35 | -2.37±0.28 | -0.032 | UDUN | 3.1 | 139.9 |
| 105.574 | 54.091 | -0.91±0.26 | -1.10±0.22 | 0.016 | LNSK | 1.4 | 219.6 |
| 105.501 | 53.059 | -1.96±0.22 | -0.35±0.22 | -0.021 | BAYA | 1.9 | 259.8 |
| 104.893 | 51.847 | 0.33±0.59 | -1.27±0.51 | -0.050 | LIST | 1.3 | 165.4 |
| 104.426 | 43.587 | 5.06±1.43 | -1.88±0.59 | 0.059 | DALA | 5.3 | 110.3 |
| 104.316 | 52.219 | -0.95±0.05 | -1.17±0.04 | -0.045 | IRKT | 1.5 | 219.0 |
| 103.743 | 51.765 | 0.29±0.25 | -0.68±0.19 | -0.069 | KULT | 0.7 | 156.9 |
| 103.704 | 51.652 | 0.71±0.25 | -0.99±0.18 | -0.067 | SLYU | 1.2 | 144.3 |
| 103.524 | 48.801 | 1.69±0.34 | -0.38±0.31 | 0.020 | BULG | 1.7 | 102.6 |
| 103.282 | 50.382 | 1.74±0.93 | 1.12±0.81 | 0.060 | ZAKM | 2.0 | 57.2 |
| 103.224 | 52.259 | -0.77±0.22 | -0.76±0.24 | 0.043 | HADR | 1.0 | 225.3 |
| 103.078 | 51.810 | -0.11±0.39 | -0.69±0.35 | 0.002 | TOR1 | 0.6 | 189.0 |
| 102.996 | 51.918 | 0.01±1.59 | -3.11±1.40 | 0.000 | TORY | 3.1 | 179.8 |
| 102.963 | 49.288 | 2.29±0.46 | -0.65±0.42 | 0.022 | SSEL | 2.3 | 105.8 |
| 102.809 | 49.455 | 0.80±0.40 | 0.08±0.39 | 0.008 | NSEL | 0.8 | 84.2 |
| 102.664 | 51.765 | -0.25±0.43 | 0.01±0.40 | -0.004 | AKHL | 0.2 | 272.2 |
| 102.348 | 51.601 | -1.13±1.28 | -0.08±1.28 | -0.054 | HARA | 1.1 | 265.9 |
| 102.214 | 51.759 | 0.16±0.12 | -1.18±0.11 | 0.003 | BADA | 1.1 | 172.2 |
| 101.796 | 47.520 | 3.46±0.56 | -1.14±0.51 | 0.058 | TSET | 3.6 | 108.2 |
| 101.609 | 50.100 | 0.94±0.33 | 1.90±0.29 | 0.022 | ERBL | 2.1 | 26.3 |
| 101.441 | 45.666 | 1.75±0.50 | -2.60±0.41 | 0.017 | TEEG | 3.1 | 146.0 |
| 101.306 | 43.085 | 3.96±1.20 | -1.36±0.51 | 0.068 | UNDU | 4.1 | 108.9 |
| 100.915 | 51.623 | -1.24±0.17 | -2.21±0.15 | 0.031 | MOND | 2.5 | 209.2 |
| 100.790 | 44.466 | 4.76±1.08 | -1.12±0.52 | 0.074 | KHAR | 4.8 | 103.2 |
| 99.802 | 52.537 | -0.04±0.17 | -0.09±0.16 | 0.039 | ORLK | 0.1 | 203.9 |
| 98.976 | 50.178 | 1.59±0.42 | -2.59±0.36 | -0.013 | BZUR | 3.0 | 148.4 |
| 98.801 | 48.707 | 3.95±0.58 | -2.03±0.39 | 0.010 | IKUL | 4.4 | 117.2 |
| 98.049 | 49.207 | 2.52±0.46 | -1.59±0.38 | 0.014 | BOL1 | 2.9 | 122.2 |
| 97.976 | 49.076 | 4.25±0.50 | -0.04±0.43 | 0.000 | BOL2 | 4.2 | 90.5 |
| 96.780 | 47.613 | 3.16±0.91 | -0.43±0.56 | 0.098 | ULIA | 3.1 | 97.7 |
| 96.252 | 46.554 | 4.69±0.85 | 1.56±0.52 | 0.074 | ALTA | 4.9 | 71.6 |

| Координаты, град. | | Скорость, мм·год ⁻¹ | | Коэффициент корреляции | Станция | Вектор | |
|-------------------|--------|--------------------------------|------------|------------------------|---------|--------------------------------|---------------|
| в.д. | с.ш. | восточная | северная | | | скорость, мм·год ⁻¹ | азимут, град. |
| 95.023 | 50.250 | 0.25±0.89 | 1.04±0.57 | 0.054 | ERZN | 1.0 | 13.5 |
| 93.570 | 52.443 | 0.27±0.49 | -0.28±0.30 | 0.049 | ARAD | 0.3 | 136.0 |
| 92.916 | 53.135 | -2.60±0.69 | -0.95±0.54 | 0.037 | TANZ | 2.7 | 249.9 |
| 92.794 | 55.993 | -0.21±0.12 | -1.05±0.07 | 0.013 | KSTU | 1.0 | 191.3 |
| 92.078 | 49.971 | 2.53±0.81 | 1.45±0.39 | 0.082 | ULAA | 2.9 | 60.1 |
| 91.629 | 47.763 | 1.37±0.84 | 4.22±0.47 | 0.076 | HOVD | 4.4 | 17.9 |
| 91.590 | 53.669 | -0.41±0.40 | -1.52±0.26 | 0.053 | ABAK | 1.5 | 195.0 |
| 91.198 | 51.334 | 1.16±0.65 | -0.18±0.32 | 0.081 | CHAD | 1.1 | 98.8 |
| 89.938 | 48.982 | 3.80±0.68 | 2.23±0.32 | 0.106 | ULGI | 4.4 | 59.5 |
| 87.601 | 43.808 | 4.12±0.08 | 8.05±0.05 | -0.013 | URUM | 9.0 | 27.1 |

смещений GPS-пунктов на территории Байкало-Монгольского региона сделаны относительно Евразии. Евразийская плита представлена 15 минимально деформированными пунктами (YAKT, TIXI, ANGA, LNSK, IRKT, KSTU, NRIL, NVSK, POL2, KIT3, ARTU, ZWEN, ONSA, NYAL, KOSG). Результаты расчетов векторов горизонтальных скоростей пунктов GPS исследуемой территории относительно Евразии представлены на рис. 1, в табл. 1.

Поле горизонтальных скоростей пунктов GPS, охватывающих структуры Монгольского Алтая, а также станции Тувинского геодезического полигона, характеризуются значениями от 4.4 (HOVD) до 2.7 (TANZ) мм·год⁻¹, причем заметное уменьшение скоростей наблюдается на профиле станций URUM—KSTU. Направление движения пунктов имеет систематический характер, они смещаются на СВ 25° с.ш. Все эти пункты находятся в сдвиговых и надвиговых зонах. Группа точек, расположенных в южных районах исследуемой территории (Гобийский Алтай), имеет выдержанное юго-восточное направление 103.2° (KHAR), 108.9° (UNDU) и 110.3° в.д. (DALA) со скоростями 4.8, 4.1 и 5.3 мм·год⁻¹ соответственно. Станция TEEG, расположенная между левосдвиговыми структурами Гобийского Алтая и Хангайского блока, характеризуется направлением вектора движения равного 146.0° и его значением 3.1 мм·год⁻¹.

Станции (IKUL, TSET и ULIA), окружающие Хангайский блок, перемещаются примерно в одном направлении (117.2°, 108.2° и 97.7°) с приблизительно равными скоростями — 4.4 мм·год⁻¹ на северной границе, 3.6 мм·год⁻¹ на восточной и 3.1 мм·год⁻¹ на западном окончании.

Ярким представителем деформаций сдвигового типа является сейсмоактивный Болнайский разлом. Геодезические станции, находящиеся на разных крыльях разлома (BOL1 и BOL2) и удаленные на 15.5 км друг от друга, имеют направления в 122.2° и 90.5° со значениями 2.9 и 4.2 мм·год⁻¹. Соответственно, разница в скоростях и направлениях составляет 1.3 мм·год⁻¹ и 31.7° на дистанцию удаления, что показывает наличие левостороннего смещения по зоне разлома и, в зависимости от падения плоскостей смещения на юг или север, с надвиговой или сбросовой составляющей движения. Направления векторов движений пунктов, огибающих Хангайский блок, могут интерпретироваться как его вращение по часовой стрелке под действием деформационных сил, вызванных коллизией Индийской и Евразийской плит. Наблюдается заметное уменьшение магнитуд скоростей горизонтального движения пунктов в направлении к западному флангу Байкальской рифтовой зоны, где скорость перемещения геодезических пунктов составляет порядка 2 мм·год⁻¹.

Для станций ERBL и ZAKM, расположенных вблизи северных границ Монголии, значения и направления векторов составляют 2.1 мм·год⁻¹, 26.3° и 2.0 мм·год⁻¹, 57.2° соответственно. Пункты вблизи границы Евразии (Тункинской впадина) также имеют минимальные значения векторов (1—1.5 мм·год⁻¹), но уже южное направление. Изменение векторов движения пунктов с субширотного на юго-восточное происходит в районах Забайкалья. Наблюдается увеличение скорости на юго-восток от Байкальского рифта при сохранении направления движения. Основная смена направлений векторов происходит в интервале между 98—102° в.д. (см. рис. 1) [Саньков и др., 2003, 2005].

Основываясь только на данных для трех южных GPS-станций (DAEJ, SUWN, BJFS), скорость Амурской плиты составляет более 3 мм·год⁻¹ [Prawirodirdjo, Bock, 2004], а по нашим расчетам — около 2 мм·год⁻¹.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ

Методика расчета

Под действием приложенных сил физические тела деформируются и перемещаются из некоторого начального положения в конечное. Предполагается, что эти положения частиц тела известны и связаны между собой некоторыми математическими отношениями. При кинематическом анализе общую деформацию тела можно описать процессами — вращением и изменением формы.

Анализ деформаций сети в пределах GPS-пунктов Байкальского, Тувинского и Монгольского геодинамических полигонов проводился с использованием программного пакета QOCA [Dong et al., 1998].

Первая стадия процедуры расчетов относительных деформаций заключалась в расчетах координат каждой станции для каждой эпохи наблюдений в широком диапазоне ошибки.

Вторая стадия состояла в объединении индивидуальных решений, полученных на первой стадии, в единое с параметрами временной зависимости. Результатом этого являются горизонтальные координаты (относительно времени отсчета) и скорость для каждой станции вместе со скоростями деформаций и вращения сети пунктов. Полное описание процедуры расчетов представлено в работе [Dong et al., 1998].

Скорости относительных горизонтальных деформаций

Триангуляционная GPS-сеть на изучаемой территории насчитывает 62 геометрические фигуры (рис. 2). В пределах этих полигонов на основании полученных скоростей пунктов GPS, являющихся вершинами геометрической фигуры, нами были рассчитаны относительные тектонические деформации удлинения и укорочения (табл. 2), имеющие размерность $1 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹.

Южная часть Монгольского полигона, охватывающая тектонические структуры, расположенные между Гобийским Алтаем и Хангаем, характеризуется выдержанной направленностью оси укорочения

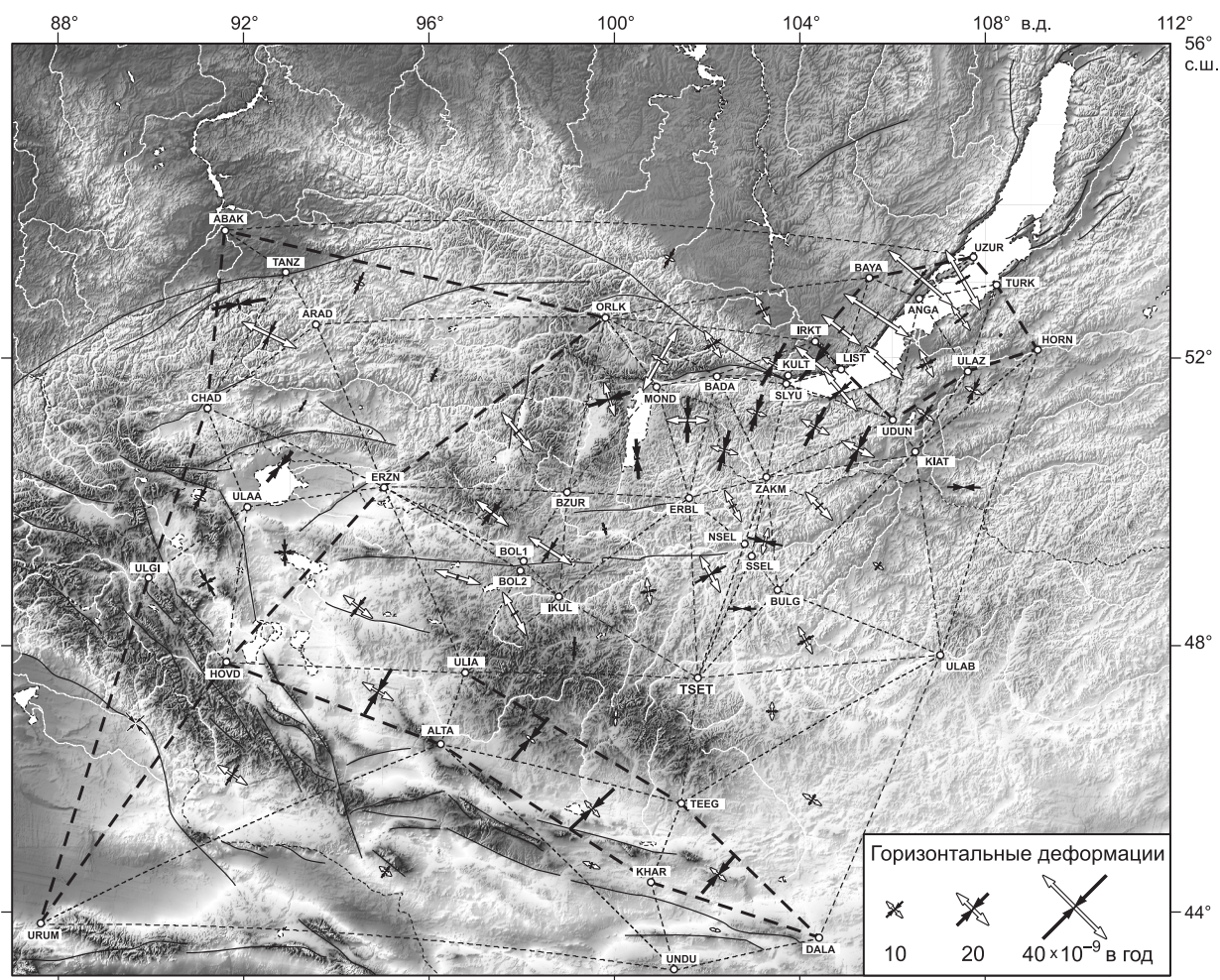


Рис. 2. Относительные деформации в пределах Байкало-Монгольской GPS-сети.

Черные — оси укорочения, белые — оси удлинения.

Таблица 2. Относительные деформации в пределах Байкало-Монгольской GPS сети

| № | Координаты, град | | $\varepsilon_1 \cdot 10^{-9}$, год ⁻¹ | $\varepsilon_2 \cdot 10^{-9}$, год ⁻¹ | $\Omega \cdot 10^{-9}$, град. · год ⁻¹ | θ , град. | Станции |
|----|------------------|-------|--|---|---|------------------|---------------------|
| | в.д. | с.ш. | | | | | |
| 1 | 100.02 | 46.95 | 7.1±2.9 | 3.3±3.1 | 7.7±2.2 | 93.6±27.9 | TEEG—TSET—ULIA |
| 2 | 100.49 | 50.63 | -2.1±2.8 | -17.5±1.7 | -15.8±2.0 | -3.8±5.9 | BZUR—ERBL—MOND |
| 3 | 100.73 | 48.78 | 11.7±2.0 | -6.6±3.3 | -7.2±2.1 | 81.9±5.1 | ERBL—IKUL—TSET |
| 4 | 100.98 | 51.97 | 31.3±3.1 | 8.2±1.8 | 9.7±2.2 | 119.5±4.4 | ORLK—BADA—MOND |
| 5 | 101.18 | 53.30 | 4.0±2.0 | -9.7±1.8 | 0.9±1.5 | 28.6±6.6 | ORLK—ABAK—BAYA—UZUR |
| 6 | 101.57 | 51.16 | 18.7±2.7 | -20.1±1.7 | -8.4±2.0 | 0.4±2.2 | BADA—ERBL—MOND |
| 7 | 102.06 | 49.02 | 18.1±3.1 | -15.4±5.4 | 4.5±3.3 | 61.1±5.4 | ERBL—NSEL—TSET |
| 8 | 102.11 | 52.18 | 13.8±1.8 | -8.3±1.5 | -0.7±1.7 | 58.3±3.0 | BADA—IRKT—ORLK |
| 9 | 102.17 | 43.72 | 4.5±5.7 | 0.7±5.7 | 6.9±5.7 | 14.7±74.3 | DALA—KHAR—UNDU |
| 10 | 102.23 | 44.58 | 9.0±3.8 | -22.2±7.0 | -4.3±4.0 | 40.5±7.1 | DALA—KHAR—TEEG |
| 11 | 102.36 | 50.74 | 12.4±8.7 | -18.4±1.8 | 1.1±4.3 | 15.5±7.7 | BADA—ERBL—ZAKM |
| 12 | 102.56 | 49.98 | 15.3±5.5 | 3.9±8.9 | 11.9±5.2 | 61.9±26.5 | ERBL—NSEL—ZAKM |
| 13 | 102.75 | 48.53 | 0.0±5.0 | -12.3±7.7 | -0.3±4.7 | 90.3±20.6 | BULG—SSEL—TSET |
| 14 | 103.06 | 51.26 | 8.8±2.9 | -16.9±5.9 | -1.3±3.7 | 17.5±7.6 | BADA—SLYU—ZAKM |
| 15 | 103.20 | 52.63 | 14.2±1.9 | -6.7±1.7 | 0.2±1.8 | 62.1±3.5 | BAYA—IRKT—ORLK |
| 16 | 103.25 | 49.49 | 11.6±7.9 | -15.9±15.4 | -7.8±8.2 | 102.9±17.0 | BULG—SSEL—ZAKM |
| 17 | 103.39 | 47.04 | 7.7±3.1 | -5.1±2.2 | 9.1±2.3 | 90.3±8.1 | TEEG—TSET—ULAB |
| 18 | 103.42 | 51.91 | 11.3±5.4 | -21.3±3.7 | -12.4±3.7 | 29.9±5.7 | BADA—IRKT—KULT |
| 19 | 104.12 | 48.08 | 13.4±3.0 | -7.9±2.7 | 0.2±2.4 | 62.2±5.3 | BULG—TSET—ULAB |
| 20 | 104.27 | 45.72 | 9.6±3.9 | -5.2±1.5 | -2.8±2.5 | 31.4±8.7 | DALA—TEEG—ULAB |
| 21 | 104.31 | 51.94 | 22.0±10.2 | -20.9±3.3 | -7.0±5.2 | 39.4±7.1 | IRKT—KULT—LIST |
| 22 | 104.32 | 51.07 | 14.1±3.1 | -19.2±6.0 | 5.1±3.7 | 28.5±5.7 | SLYU—UDUN—ZAKM |
| 23 | 104.41 | 49.98 | 17.2±6.6 | -4.1±1.7 | 10.8±3.8 | 46.0±9.7 | BULG—KIAT—ZAKM |
| 24 | 104.87 | 51.56 | 22.7±7.1 | -12.8±10.7 | -4.9±7.0 | 49.8±10.2 | LIST—SLYU—UDUN |
| 25 | 104.89 | 52.37 | 21.9±10.2 | -3.7±1.9 | -8.3±4.9 | 37.9±11.4 | BAYA—IRKT—LIST |
| 26 | 105.25 | 50.77 | 16.3±5.9 | -22.7±6.4 | 2.0±4.6 | 26.6±6.3 | KIAT—UDUN—ZAKM |
| 27 | 105.65 | 52.56 | 34.5±4.5 | -3.5±3.7 | -6.8±3.2 | 33.5±4.5 | ANGA—BAYA—LIST |
| 28 | 105.68 | 49.14 | 4.8±1.7 | -4.2±1.5 | 8.7±1.7 | 35.2±7.7 | BULG—KIAT—ULAB |
| 29 | 105.82 | 51.93 | 22.3±6.3 | -1.5±3.3 | -0.3±3.5 | 41.8±8.8 | ANGA—LIST—UDUN |
| 30 | 106.60 | 53.06 | 37.1±5.5 | -8.5±4.2 | -13.0±3.9 | 40.4±3.8 | BAYA—ANGA—UZUR |
| 31 | 106.70 | 51.24 | 9.5±7.4 | -11.3±2.1 | -8.2±3.9 | 37.9±10.6 | KIAT—UDUN—ULAZ |
| 32 | 106.73 | 51.92 | 13.6±2.0 | -9.2±2.8 | 0.6±2.2 | 63.0±4.2 | ANGA—UDUN—ULAZ |
| 33 | 107.48 | 52.52 | 13.4±2.3 | -7.3±2.2 | 4.5±1.9 | 52.9±4.6 | ANGA—TURK—ULAZ |
| 34 | 107.52 | 53.02 | 30.4±4.6 | -7.3±3.4 | 0.9±3.1 | 60.0±4.4 | ANGA—TURK—UZUR |
| 35 | 107.54 | 50.24 | 0.4±0.7 | -14.6±3.4 | 2.2±2.0 | 91.3±6.1 | HORN—KIAT—ULAB |
| 36 | 107.74 | 51.56 | 8.0±5.1 | -11.8±2.7 | -13.0±3.1 | 24.4±8.5 | ULAZ—KIAT—HORN |
| 37 | 108.33 | 52.30 | 1.3±2.8 | -1.4±2.2 | -3.9±2.2 | 54.3±38.9 | ULAZ—HORN—TURK |
| 38 | 89.66 | 46.86 | -10.4±2.5 | -13.2±4.4 | 2.4±2.5 | -41.9±60.8 | HOVD—ULGI—URUM |
| 39 | 91.06 | 50.09 | 5.2±7.7 | -12.5±2.4 | -3.2±3.2 | 27.2±13.9 | CHAD—ULAA—ULGI |
| 40 | 91.21 | 48.90 | -8.7±5.4 | -13.4±3.6 | 3.6±3.2 | -29.7±40.2 | HOVD—ULAA—ULGI |
| 41 | 91.75 | 46.09 | 15.7±2.9 | -10.5±1.4 | 1.8±2.1 | 33.9±3.6 | ALTA—HOVD—URUM |
| 42 | 91.89 | 52.71 | -4.7±2.4 | -24.2±6.8 | -0.4±3.5 | 79.2±10.0 | ABAK—CHAD—TANZ |
| 43 | 92.54 | 52.30 | 26.6±8.0 | -13.5±3.4 | -13.4±4.3 | 25.8±6.4 | ARAD—CHAD—TANZ |
| 44 | 92.77 | 50.53 | 2.0±3.6 | -17.6±6.5 | -3.7±4.3 | 40.4±8.7 | CHAD—ERZN—ULAA |
| 45 | 92.88 | 49.33 | -9.3±6.4 | -11.6±2.8 | 5.7±3.5 | -1.3±76.3 | ERZN—HOVD—ULAA |
| 46 | 93.27 | 51.35 | 0.5±3.5 | -5.9±3.0 | 0.8±2.6 | 32.1±20.5 | ARAD—CHAD—ERZN |

| № | Координаты, град | | $\varepsilon_1 \cdot 10^{-9}$, год ⁻¹ | $\varepsilon_2 \cdot 10^{-9}$, год ⁻¹ | $\Omega \cdot 10^{-9}$, град. · год ⁻¹ | θ , град. | Станции |
|----|------------------|-------|--|---|---|------------------|---------------------|
| | в.д. | с.ш. | | | | | |
| 47 | 94.47 | 48.56 | 16.0±3.3 | -10.5±2.8 | 5.0±2.5 | 38.3±4.7 | ERZN—HOVD—ULIA |
| 48 | 94.49 | 52.98 | 4.6±2.0 | -10.3±3.2 | 0.3±2.4 | 23.6±7.6 | ORLK—ARAD—TANZ—ABAK |
| 49 | 94.89 | 47.33 | 15.3±3.4 | -23.1±7.4 | 1.7±5.1 | 30.6±5.3 | ALTA—HOVD—ULIA |
| 50 | 95.06 | 44.62 | 6.1±2.2 | -6.1±1.9 | 8.2±2.1 | 35.8±6.1 | ALTA—UNDU—URUM |
| 51 | 96.11 | 51.77 | 2.8±2.7 | -6.4±2.5 | 2.5±2.4 | 24.9±12.2 | ARAD—ERZN—ORLK |
| 52 | 96.60 | 48.98 | 21.3±4.7 | 2.7±3.8 | 3.2±3.2 | 16.8±8.9 | BOL2—ERZN—ULIA |
| 53 | 97.35 | 49.89 | 18.2±4.0 | -13.6±4.2 | 3.5±3.2 | 38.4±5.3 | BOL1—BZUR—ERZN |
| 54 | 97.84 | 48.46 | 21.5±8.2 | -3.7±5.9 | 18.1±5.2 | 61.2±11.1 | BOL2—IKUL—ULIA |
| 55 | 97.90 | 51.00 | 22.2±3.1 | -4.4±2.1 | 5.5±2.1 | 51.2±4.3 | BZUR—ERZN—ORLK |
| 56 | 98.18 | 46.63 | 4.9±3.3 | -25.1±7.9 | 4.1±4.9 | 40.7±6.4 | ALTA—TEEG—ULIA |
| 57 | 98.60 | 49.36 | 22.9±9.5 | -13.1±4.4 | 0.2±4.8 | 32.7±8.8 | BOL1—BZUR—IKUL |
| 58 | 99.12 | 47.96 | 3.2±3.0 | -10.3±4.5 | 7.1±3.7 | 3.5±14.9 | IKUL—TSET—ULIA |
| 59 | 99.50 | 44.72 | 7.9±6.8 | -2.6±10.3 | 10.4±7.5 | 21.9±25.2 | ALTA—KHAR—UNDU |
| 60 | 99.52 | 45.58 | 9.4±3.6 | -26.1±6.3 | 0.2±4.3 | 47.4±4.6 | ALTA—KHAR—TEEG |
| 61 | 99.78 | 49.66 | -1.7±2.4 | -5.7±3.7 | -16.3±2.8 | -17.2±33.9 | BZUR—ERBL—IKUL |
| 62 | 99.88 | 51.44 | 15.6±1.5 | -19.6±2.7 | 7.6±1.9 | 71.9±2.4 | BZUR—MOND—ORLK |

Примечание. ε_1 — скорость максимального удлинения; ε_2 — скорость максимального укорочения; Ω — скорость вращения; θ — азимут простирания оси максимальных деформаций укорочения (отсчитывается от направления на север, положительные значения в восточных румбах, отрицательные — в западных).

$\theta = -40.5 \pm 7.1^\circ$, со значением скорости укорочения $\varepsilon_2 = (22.2 \pm 7.0) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Сопоставимые значения и направления осей как укорочения, так и удлинения наблюдаются на всем протяжении Гобийского Алтая, вплоть до его сочленения со структурами Долины Больших Озер, где деформации укорочения являются всесторонними.

Южная часть Хангая покрывается треугольником № 56 (см. табл. 2), в котором максимальная ось укорочения ориентирована на СВ $\theta = 40.7 \pm 6.4^\circ$, а скорость укорочения составляет $\varepsilon_2 = (25.1 \pm 7.9) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Ось укорочения в фигуре, покрывающей северную часть Хангая (см. табл. 2, № 58), направлена субмеридионально $\theta = 3.5 \pm 14.9^\circ$ со значением $\varepsilon_2 = (10.3 \pm 4.5) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Подобная ситуация наблюдается и в центральной части Хангайского блока (см. табл. 2, № 1), только в этом случае оси укорочения и удлинения меняются пространственно друг с другом $\theta = 93.6 \pm 27.9^\circ$, оставаясь приблизительно равными по значениям $\varepsilon_2 = (3.3 \pm 3.1) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹, $\varepsilon_1 = (7.1 \pm 2.9) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Разворот осей укорочения и удлинения, по-видимому, связан с активным поднятием Хангая и развалом его в центральной части, в то время как сжимающие усилия концентрируются по границам этого блока.

На юго-западе Монголии треугольники, покрывающие южную часть структур Монгольского Алтая, Долину Больших Озер, характеризуются обстановкой всеобщего сжатия и невыдержанностью ориентаций осей укорочения и удлинения. Так, четыре треугольных фигуры с общей вершиной в геодезическом пункте ULAA обладают деформациями всестороннего укорочения со значениями, приблизительно равными $\varepsilon_2 = (13.4 \pm 3.6) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹, но ориентация варьирует в широких пределах. Северо-восточнее этой территории наблюдается преобладание деформаций сокращения, но их значения уменьшаются до $\varepsilon_2 = (5.9 \pm 3.0) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹, при выдержанной ориентировке в $\theta = 32.1 \pm 20.5^\circ$.

Ярким примером территорий с преобладанием деформаций сокращения является район Хамар-Дабана до восточной части оз. Хубсугул. Его особенностью является выдержанность пространственной ориентировки осей укорочения (северо-восточное) и удлинения (северо-западное) со значениями $\varepsilon_2 = (19.2 \pm 6.0) \cdot 10^{-9}$, $\varepsilon_1 = (14.1 \pm 3.1) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Причем западный треугольник с вершинами BZUR—ERBL—MOND тяготеет к укорочению ($\varepsilon_2 = (17.5 \pm 1.7) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹), а восточные площади (см. табл. 2, № 21, 24) к удлинению ($\varepsilon_1 = (22.0 \pm 10.2) \cdot 10^{-9}$, $\varepsilon_1 = (22.7 \pm 7.1) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹). Возможно, что данные районы, например центральная часть Байкальского рифта, входят в так называемые перестраиваемые, где доминирующую роль играют силы, вызывающие удлинения (см. табл. 2, № 29, $\varepsilon_1 = (22.3 \pm 6.3) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹). Такие магнитуды являются несколько большими, чем полученные ранее результаты ($>3 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹) [Calais et al., 2006].

Скорости вращения

Вращение блоков является одной из характеристик описания тектонических деформаций (рис. 3, см. табл. 2).

Основным типом вращения на всей территории Центральной Азии является движение по часовой стрелке размерностью $1 \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹. Основными характеристиками вращений являются малые скорости в пределах $\Omega = 6 \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹.

Выделяются несколько полигонов, которым свойственны вращения против часовой стрелки. Так, на северо-западе нашей GPS-сети территории Тувы и северной части Долины Больших Озер Монголии, оконтуренные базовыми линиями с вершинами в геодезических пунктах АВАК—ТАНЗ—АРАД—ЕРЗН—УЛАА—УЛГИ—СНАД, вращаются против часовой стрелки со средними скоростями $\Omega = 3.7 \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹. Интересно, что граничащие с юга треугольники № 40, 45 имеют такие же скорости вращения $\Omega = (3.6 \pm 3.2) \cdot 10^{-9}$ и $\Omega = (5.7 \pm 3.5) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹, но направление вращения — обратное.

Другой блок (треугольники с вершинами в пунктах УЛАВ—ТЕЕГ—КХАР—ДАЛА) с вращениями против часовой стрелки охватывает юго-восточный фланг Гобийского Алтая, краем затрагивает юго-восточную границу Хангайского блока. Здесь скорости вращения еще меньше и равны $\Omega = (-2.8 \pm 2.5) \cdot 10^{-9}$, $\Omega = (-4.3 \pm 4.0) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹ (см. табл. 2, № 20, 10).

Два больших участка GPS-полигона с вращениями против часовой стрелки присутствуют в центральной части северной Монголии и центральной части Байкальского рифта. Первый описывается треугольниками БАДА—БЗУР—БОЛ1—ИКУЛ—ТСЕТ—ЕРБЛ, где скорости в центре данной площади выше ($\Omega = (-15.8 \pm 2.0) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹; $\Omega = (-16.3 \pm 2.8) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹, № 2, 61), чем на краях ($\Omega = (-8.4 \pm 2.0) \cdot 10^{-9}$, $\Omega = (-7.2 \pm 2.1) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹ (№ 6, 3).

Второй блок с вращениями против часовой стрелки охватывает структуры растяжения, развитые в центральной части Байкальского рифта и Забайкалья. Данная территория оконтуривается многоугольни-

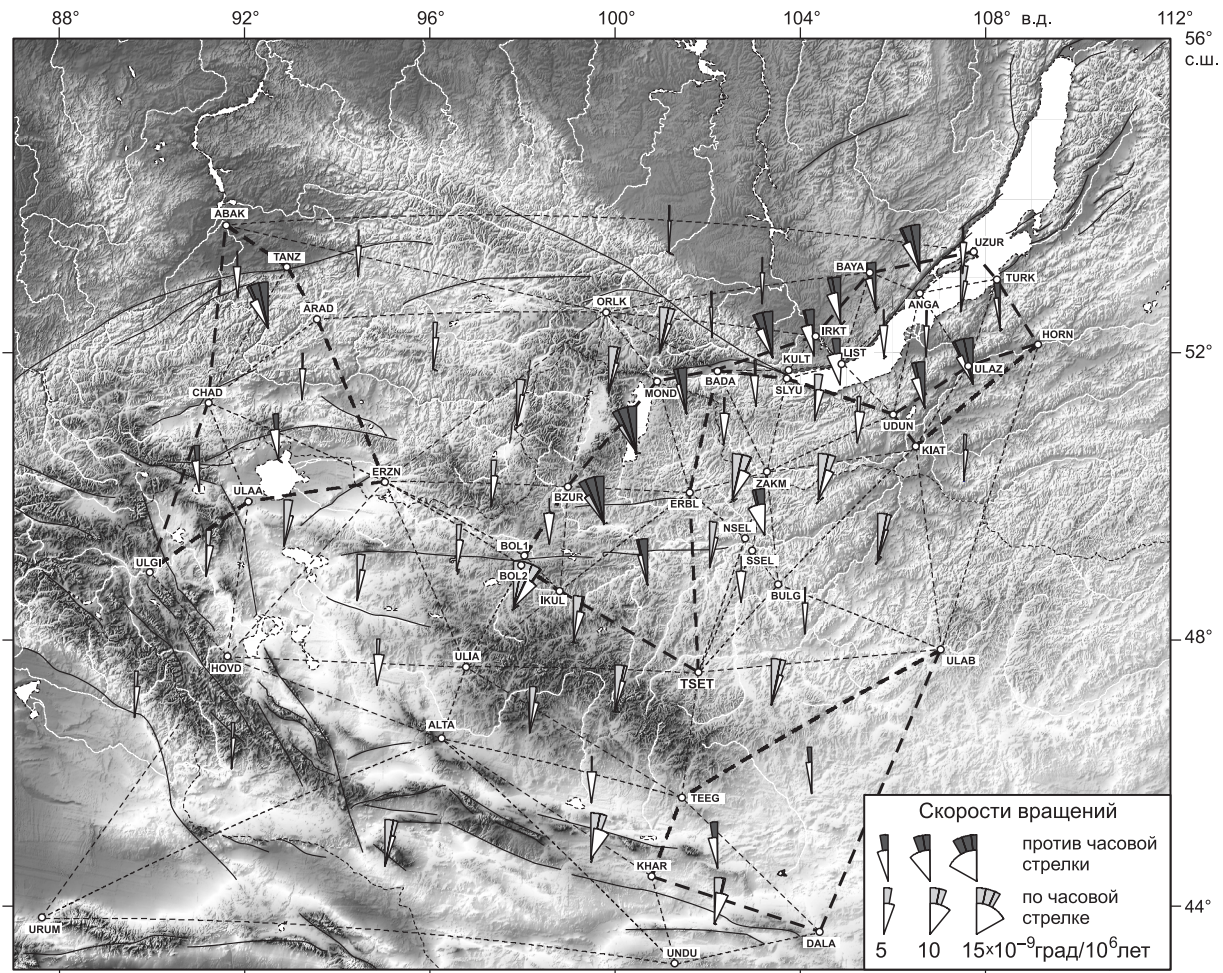


Рис. 3. Скорости и направления вращения участков в пределах Байкало-Монгольской GPS-сети.

Светло-серые веера — правостороннее вращение, темно-серые — левостороннее.

ком с вершинами IRKT—BADA—SLYU—UDUN—KIAT—HORN—TURK—UZUR—BAYA. Средние скорости вращений полигонов этого блока имеют значения от $\Omega = (0.3 \pm 3.5) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹ (№ 29) до $\Omega = (-13.0 \pm 3.9) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹ (№ 30). Отличительной особенностью описываемого участка является некоторое увеличение скоростей вращения к его краям.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Комплексный анализ данных GPS за период с 1994 по 2007 г. показывает, что северо-восточное направление движения пунктов полигона, наблюдаемое на большей части исследуемой территории, меняется на юго-восточное в районах Забайкалья, причем скорость пунктов увеличивается на юго-восток от Байкальского рифта, а их направления сохраняются. Несмотря на отсутствие сейсмологических и геологических данных о наличии границы между Евразийской и Амурской плитами на ее западном участке, изменение направлений и скоростей GPS-пунктов, наличие совокупности доменов с разнонаправленным вращением подтверждают ее существование. Результаты GPS-измерений позволяют установить перемещение Амурской тектонической плиты в юго-восточном направлении со скоростью порядка 2 мм·год⁻¹, что наряду с увеличением высот в центральной части Монголии и хр. Хамар-Дабан подтверждают гипотезу о выжимании Амурской плиты в результате коллизионных процессов между Индостаном и Евразийской плитой.

Анализ относительных деформаций позволяет выделить участки структур с преимущественно *сокращающимися*, *расширяющимися* и *переходными* зонами.

Сокращающиеся выявлены в Гобийском и Монгольском Алтае, а также в районе хр. Хамар-Дабан, где значения и ориентировка осей укорочения составляют $\varepsilon_2 = (19.2 \pm 6.0) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹ и $\theta = 28.5 \pm 5.7^\circ$ соответственно.

Расширяющиеся участки, расположены в центральной части Байкальского рифта и в районе Долины Больших Озер Монголии и далее на северо-восток. Здесь магнитуды осей удлинения преобладают ($\varepsilon_1 = (22.2 \pm 3.1) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹) и ориентированы в $\theta = -38.8 \pm 4.3^\circ$.

Переходные же зоны отмечены в центральной части Монголии, между структурами Гобийского Алтая и хр. Хамар-Дабан, где значения осей укорочения и удлинения приблизительно равны $\varepsilon_2 = (15.4 \pm 5.4) \cdot 10^{-9}$, $\varepsilon_1 = (18.1 \pm 3.1) \cdot 10^{-9}$ год⁻¹ и не имеют выдержанной ориентировки.

Основным типом движений на всей территории Центральной Азии является вращение по часовой стрелке со скоростями порядка $1 \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹. Основными характеристиками вращений являются малые скорости с магнитудами порядка $\Omega = 6 \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹.

На фоне основного типа вращения по часовой стрелке выделены несколько блоков с обратным движением. Районы Тувы и северная часть Долины Больших Озер Монголии имеют скорости вращения, равные $3.7 \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹. Юго-восточный фланг структуры Гобийского Алтая краем затрагивает юго-восточную границу Хангайского блока, где значения еще меньше $\Omega = (2.8 \pm 2.5) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹, а центральная часть Монголии описывается вращениями со скоростями $\Omega = (16.3 \pm 2.8) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹ против часовой стрелки.

Представители структур растяжения, распространенные в центральной части Байкальского рифта и Забайкалья, имеют скорости левосторонних вращений от $\Omega = (0.3 \pm 3.5) \cdot 10^{-9}$ до $\Omega = (13.0 \pm 3.9) \cdot 10^{-9}$ град·год⁻¹.

Мы благодарим французских коллег за инициацию GPS-исследований в Байкальском регионе, в частности, Ж. Девершера за ценные замечания при обсуждении результатов. Благодарим монгольских коллег Научного центра астрономии и геофизики за помощь в организации и проведении полевых измерений на территории Монголии.

Работа выполнена при частичной поддержке программы 16.9 Президиума РАН, РФФИ (гранты 08-05-00992, 08-05-98113), МИПСО РАН № 56 и программы ОНЗ № 77.

ЛИТЕРАТУРА

Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Леви К.Г., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Залуцкий В.Т., Кале Э., Девершер Ж., Верноль М., Бехтур Б., Амаржаргал Ш. Новые данные о современных тектонических деформациях южного горного обрамления Сибирской платформы // Докл. РАН, 2003, т. 389, № 1, с. 100—103.

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., Леви К.Г., Ашурков С.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж., Верноль М., Бехтур Б., Амаржаргал Ш. Современные движения земной коры Монголо-Сибирского региона по данным GPS-геодезии // Докл. РАН, 2003, т. 392, № 6, с. 792—795.

Саньков В.А., Чипизубов А.В., Лухнев А.В., Смекалин О.П., Мирошниченко А.И., Кале Э., Девершер Ж. 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.

Саньков В.А., Лухнев А.В., Радзиминович Н.А., Мельникова Н.И., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э., Девершер Ж. Количественная оценка современных деформаций земной коры Монгольского блока по данным GPS-геодезии и сейсмотектоники // Докл. РАН, 2005, т. 403, № 5, с. 685—688.

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.

Apel E.V., Burgmann R., Steblov G., Vasilenko N., King R., Prutkov A. Independent active microplate tectonics of northeast Asia from GPS velocities and block modeling // Geophys. Res. Lett., 2006, v. 336 L11303, doi:10.1029/2006GL026077.

Argus D., Heflin M. Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System // Geophys. Res. Lett., 1995, v. 22, p. 1973—1976.

Avouac J.P., Tapponnier P. Kinematics model of deformation in central Asia // Geophys. Res. Lett., 1993, v. 20, p. 895—898.

Beutler G., Kouba J., Springer T. Combining the orbits of the IGS processing centers // Proceeding of the IGS: analysis center workshop / Ed. J. Kuba. Geodyn. Surv. Can., Geomatics Can., Nat. Resour. Can., Ottawa, Ontario, 1993, p. 20—56.

Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnichenko A., Amarjargal S., Deverchere J. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994—2002): implication 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, 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.

Dong D., Herring T.A., King R.W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data // J. Geod., 1998, v. 72, p. 200—214.

England P.C., Molnar P. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults // Geophys. Res. Int., 1997, v. 130, p. 551—582.

Heki K., Miyazaki S., Takashi H., Kasahara M., Kimata F., Miura S., An K. The Amurian plate motion and current plate kinematics in East Asia // J. Geophys. Res., 1999, v. 104, p. 29147—29155.

Herring T.A., Davis J.L., Shapiro I.I. Geodesy by radio interferometry: the application of Kalman filtering to the analysis of very long baseline interferometry data // J. Geophys. Res., 1990, v. 95, p. 12561—12581.

Jin S., 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.

King R.W., Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS software analysis version 10.3. Cambridge, Mass. Inst. Technol., 2006, 182 p.

Larson K., Burgmann R., Bilham R., Freymueller J.T. Kinematics of the India-Eurasia collision zone from GPS measurements // J. Geophys. Res., 1999, v. 104, p. 1077—1093.

Li P., Cui J., Li L., Gao R. Estimation of shortening between the Siberian and Indian plates since the Early Cretaceous // J. Asian Earth Sci., 2002, v. 20, p. 241—245.

Prawirodirdjo L., Bock Y. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations // J. Geophys. Res., 2004, v. 109, B08405, doi:10.1029/2003JB002944.

Wang Q., Zhang P.-Z., Freymueller J.T., Bilham R., Larson K.M., Lai X., You X., Niu Z., Wu J., Li Y., Liu J., Yang Z., Qizhi C. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements // Science, 2001, v. 294, p. 574—577.

Wei D., Seno T. Determination of the Amurian plate motion // Mantle dynamics and plate interaction in East Asia. Geodyn. Ser. V. 27 / Ed. M.F.J. Flower. Washington, AGU, 1998, p. 337—346.

Wu J.C., Xu C.J., Chao D.B., Liu J.N., Li Y.X. Research on an intraplate movement model by inversion of GPS data in North China // J. Geod., 2001, v. 31, p. 507—518.

Yang Y., Liu M. Deformation of convergent plates: evidence from discrepancies between GPS velocities and rigid-plate motions // Geophys. Res. Lett., 2002, v. 29 № 10, doi:10.1029/2001GL013391.

Zhang P., Shen Z., Wang M., Gan W.J., Burgmann R., Molnar P. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data // Geology, 2004, v. 32, № 9, p. 809—812.

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 14 августа 2009 г.
А.Д. Дучковым*

*Поступила в редакцию
29 апреля 2009 г.*