

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ GPS-ИЗМЕРЕНИЙ НА УЛАН-БАТОРСКОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

А.И. Мирошниченко¹, Н.А. Радзиминович¹, А.В. Лухнев¹, Ф.Л. Зуев¹,
С. Дэмбэрэл², Д. Эрдэнэзул², М. Улзийбат²

¹Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

²Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

Представлены первые результаты анализа GPS-измерений на 18 полевых пунктах двух локальных геодинамических полигонов в окрестностях г. Улан-Батор (Монголия) за период 2010—2015 гг. В системе ITRF2014 векторы скоростей согласованы между собой и с вектором постоянного пункта ULAB. Пункты смещаются на восток–юго-восток со скоростями 25—30 мм/год, азимут смещения в среднем составляет 105°. Относительно Евразии векторы для большинства пунктов несколько развернуты к югу, но также движутся на юго-восток по азимуту 130—150° со скоростью 2—4 мм/год. Наблюдается уменьшение относительных скоростей перемещения в направлении на юго-восток. В пределах полигона «Ulaanbaatar» установлена зональность в распределении типов относительных горизонтальных деформаций земной коры. Западная часть полигона характеризуется преобладающим растяжением в субширотном направлении, величина удлинения составляет $\epsilon_1 = (12-16) \cdot 10^{-8}$ год⁻¹. В восточной части полигона наблюдаются деформации укорочения в направлении СЗ-ЮВ со значениями $\epsilon_2 = 22.4 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹. Наиболее высокие значения максимальных сдвиговых деформаций ($\epsilon_{\max} = (10-14) \cdot 10^{-8}$ год⁻¹) образуют протяженную область в центре полигона, вытянутую в северо-восточном направлении согласно с простираем основных геологических структур. Для деформаций полигона «Emeelt», расположенного в пределах сейсмогенерирующей структуры Эмелт, характерно удлинение земной коры в ЮВ-СЗ направлении и несколько меньшее по величине укорочение в ЮЗ-СВ румбах. Величина скорости удлинения достигает $5 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹. Максимальными деформациями характеризуется осевая часть разлома, пересекающего полигон в СЗ направлении.

GPS-измерения, деформации земной коры, разлом, сейсмичность, Монголия.

FIRST RESULTS OF GPS MEASUREMENTS ON ULAANBAATAR GEODYNAMIC TEST GROUND

A.I. Miroshnichenko, N.A. Radziminovich, A.V. Lukhnev, F.L. Zuev,
S. Demberel, D. Erdenezul, and M. Ulziibat

First results of the analysis of GPS measurement data obtained from 18 sites of two local geodynamic test grounds in the vicinity of Ulaanbaatar (Mongolia) for the period 2010–2015 have been presented. Horizontal velocity vectors are coordinated with each other in the ITRF2014 system and with the velocities from the IGS permanent station ULAB. The sites are shifted in the E–SE direction at a rate of 25–30 mm/yr, with the displacement azimuth averaging 105°. With respect to Eurasia, the vectors for most of the sites are to a certain extent S-trending, but their continued motion (2–4 mm/yr) is also oriented SE with the azimuth range 130–150. Relative horizontal velocities tend to decrease toward the southeast, with their zonal structures established within the Ulaanbaatar test ground area. The western part of the Ulaanbaatar test ground is dominated by roughly W–E extension, the elongation is $\epsilon_1 = (12-16) \cdot 10^{-8}$ yr⁻¹. The shortening NW–SE trending strain with calculated value $\epsilon_2 = 22.4 \cdot 10^{-8}$ yr⁻¹ characterizes the test ground's eastern part. The highest values of the maximum shear strains ($\epsilon_{\max} = (10-14) \cdot 10^{-8}$ yr⁻¹) form an extended area in the center of the test ground, elongated in the northeastern direction, conformably with the strike of the major geologic structures. The strain distribution pattern of the Emeelt test ground located within the eponymous seismogenic structures is characterized by the crustal elongation ($5 \cdot 10^{-6}$ yr⁻¹) trending SE–NW and less pronounced shortening in the SW–SE directions. The axial part of the fault crossing the test ground in the NW direction exhibits maximum deformations.

GPS measurements, crust strain, fault, seismicity, Mongolia

ВВЕДЕНИЕ

Улан-Батор, столица Монголии, является крупнейшим городом страны, где проживает треть населения Монголии, около 1.2 млн человек. В столице сосредоточены промышленные предприятия и предприятия энергетики, это крупнейший транспортный пункт Монголии. В последнее время город застраивается высотными офисными и жилыми зданиями, также город разрастается вширь за счет юр-

© А.И. Мирошниченко[✉], Н.А. Радзиминович, А.В. Лухнев, Ф.Л. Зуев, С. Дэмбэрэл, Д. Эрдэнэзул, М. Улзийбат, 2018

[✉]e-mail: miraniv@yandex.ru

DOI: 10.15372/GiG20180812

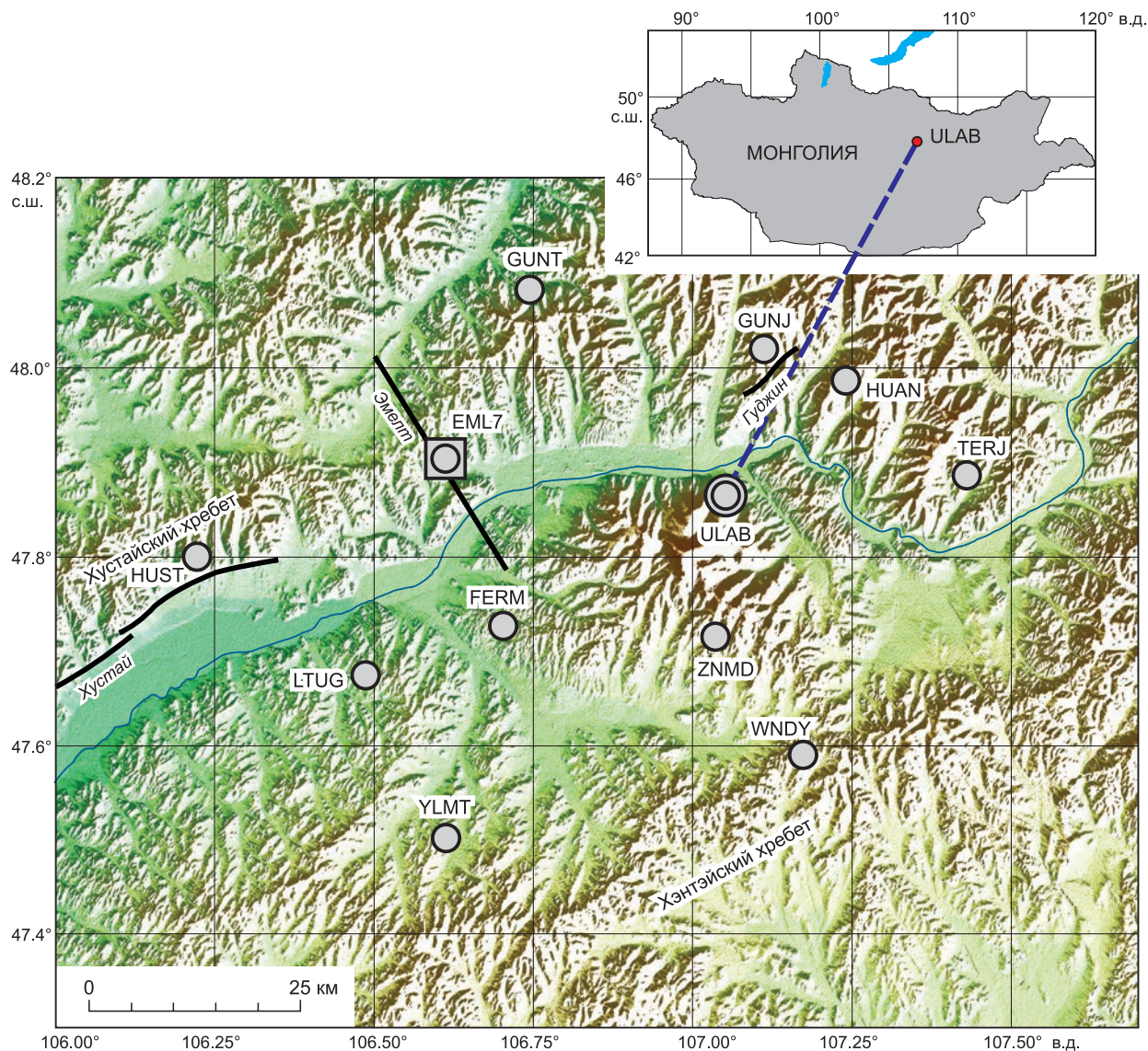


Рис. 1. Местоположение локальных GPS-полигонов.

Кружками отмечено положение пунктов полигона «Ulaanbaatar», двойной кружок — пункт сети IGS — ULAB; квадрат показывает расположение GPS-полигона «Emeel». Черные линии — сейсмогенерирующие участки активных разломов, упомянутых в статье.

точных поселений на окраинах. Интенсивное строительство приводит к необходимости более глубокого изучения геологических рисков на территории города и в его окрестностях. В первую очередь это касается оценки сейсмической опасности, поскольку Улан-Батор испытывает как транзитные сотрясения от сильных землетрясений крупных сейсмогенерирующих структур Монголии (например, Гобийский Алтай, Могодская зона разломов, Дэрэнский разлом и др.), так и сотрясения от местных источников.

Улан-Батор расположен в южной краевой части Хэнтэйского нагорья, в пределах субширотного участка долины р. Тола. С юго-запада и юго-востока долина Тола ограничена двумя параллельными хребтами: Хустайским и юго-западным окончанием осевого хребта горной системы Хэнтэй соответственно (рис. 1). На севере город обрамляют южные отроги Бага-Хэнтэйского хребта. В геологическом отношении данная территория представлена мощными толщами песчаников, аргиллитов, кварцитов с прослоями кремней и линз известняка позднепалеозойского возраста. Осадочно-метаморфизованные породы слагают складчатый комплекс, имеющий северо-восточное генеральное простирание [Geological..., 1998]. Осадочные породы прорваны гранитоидами мезозойского возраста, выходы которых на поверхность наблюдаются преимущественно на юго-востоке изучаемой области. Значительный по объему гранитоидный массив образует хр. Богд-Хан-Уул, обрамляющий Улан-Батор с юга.

В пределах изучаемой территории существует сложная система северо-западных, северо-восточных и широтных разломных зон. В целом разломы северо-восточного простирания описываются как левые сдвиги, иногда со сбросовой составляющей, северо-западные разломы характеризуются правосторонней подвижкой со взбросовой составляющей, широтные трактуются как надвиговые системы. Современная активность большей части разломных структур подтверждается их сейсмической активностью и наличием в их зонах палеосейсмодислокаций, например, Хустайская и Гунжинская структуры (см. рис. 1).

Данная территория характеризуется умеренным уровнем современной сейсмичности с эпицентрами землетрясений, рассредоточенными в пространстве [Dugarmaa, Schlupp, 2000]. Однако проведенные в последние годы сейсмогеологические исследования, выявившие несколько палеоземлетрясений с магнитудами 7.0—7.4 в непосредственной близости от города, показывают на возможность интенсивности сотрясений в 8—9 баллов [Имаев и др., 2012]. Кроме того, особый интерес вызывает возросшая с 2005 г. вблизи Улан-Батора сейсмическая активность, которая заключается в увеличении числа слабых землетрясений и их группируемости в пространстве.

Важной частью комплексных исследований, проводимых на территории исследования [Ульзибат, Дугарма, 2010; Ferry et al., 2010; Семинский и др., 2012; Demberel et al., 2012, 2014; Имаев и др., 2012; Смекалин и др., 2013; Seminsky, Demberel, 2013; Турутанов и др., 2015; и др.], является применение методов спутниковой геодезии для оценки скорости деформации разномасштабных тектонических структур, определения скорости и типа современных подвижек по разломам. Для решения указанных задач усилиями сотрудников Института астрономии и геофизики МАН и Института земной коры СО РАН в 2010 г. в окрестностях Улан-Батора создан GPS-полигон «Ulaanbaatar». В его составе была организована локальная сеть GPS-пунктов «Emeelt» в пределах разломной зоны Эмелт, которая наиболее ярко проявлена в поле эпицентров землетрясений.

Результаты измерений на данных полигонах могут представлять интерес не только для решений локальных и региональных задач, но и для анализа геодинамики всей Центральной Азии. Полученные ранее результаты геодезических измерений в Байкало-Монгольском регионе, совмещенные с данными по Китаю [Calais et al., 2003], позволили установить различие деформационных режимов на территории Монголии западнее и восточнее меридиана 96°. В Западной Монголии векторы скоростей, рассчитанные относительно Евразии, ориентированы в направлении юго-запад—север—северо-восток, их величина закономерно уменьшается от 10 (Урумчи, Китай) до 4 мм/год в Алтае. В Центральной и Восточной Монголии векторы скоростей направлены на восток и юго-восток (рис. 2). Скорость смещения пункта ULAB (Улан-Батор) по азимуту 148° составляет 2.2 мм/год [Лухнев и др., 2010]. Считается, что ССВ движение пунктов в Западной и Центральной Монголии является следствием эффекта Индоазиатской коллизии, а движение пунктов в восточной части обусловлено влиянием Тихоокеанской субдукции. Не-

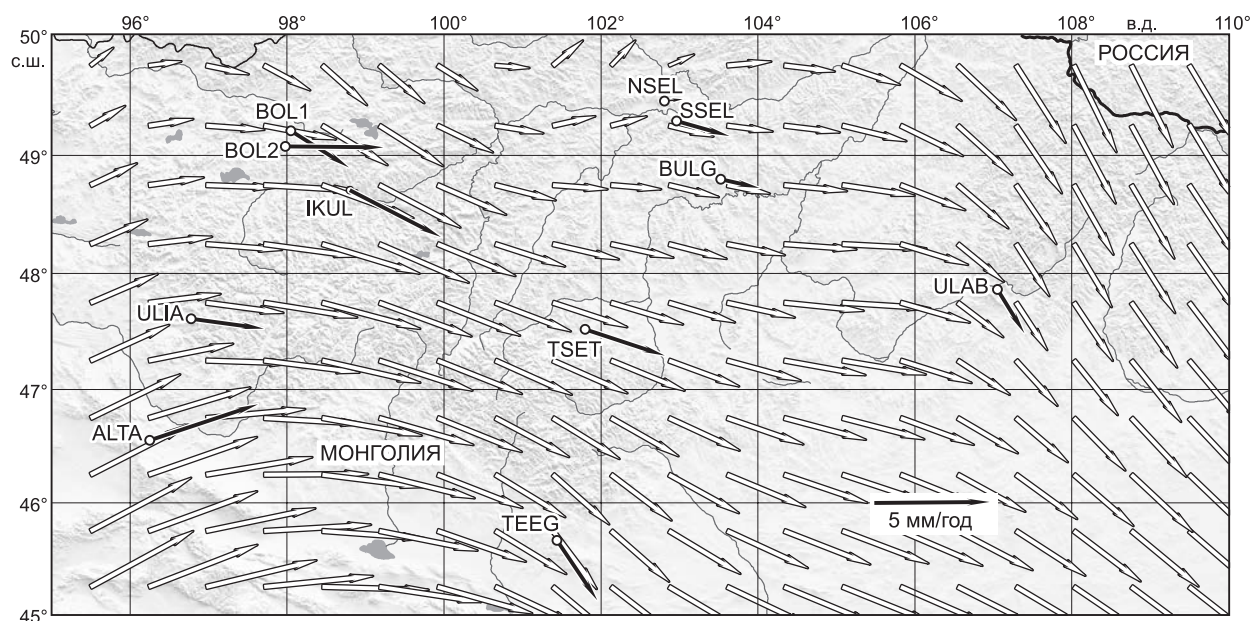


Рис. 2. Поле горизонтальных скоростей GPS по отношению к Евразии (по материалам [Лухнев и др., 2010]).

Белые стрелки — скорости, усредненные по сетке 30'×30'.

которые исследователи связывают это движение с влиянием дивергенции Северной Евразии и Амурской плиты под воздействием длительно живущего крупномасштабного потока вещества верхней мантии в направлении с СЗ на ЮВ [Sankov, 2014]. Подтверждение существования данного потока приводится в недавней публикации [Zhengyang Qiang et al., 2017].

В данной статье мы представляем первые результаты измерений на улан-баторских GPS-полигонах, выполненные за 2010—2015 гг. На основе анализа работы на полигонах, в настоящее время разработан и реализуется проект установки стационарных GPS-пунктов для мониторинга деформаций земной поверхности с целью оценки сейсмической опасности Улан-Батора.

ОПИСАНИЕ ПОЛИГОНА И МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ

В течение 2010—2011 гг. в окрестностях Улан-Батора были установлены реперы для 18 GPS-пунктов. Репер, представляющий собой металлический стержень из нержавеющей стали диаметром 15—25 мм, устанавливался в шпур, пробуренный в ненарушенных трещиноватостью массивных коренных горных породах, и фиксировался цементным раствором. Для установки измерительной системы в центре верхнего торца металлического стержня высверливалось отверстие диаметром и глубиной 1 мм.

Данные пункты и постоянная GPS-станция ULAB (Улан-Батор), входящая в международную сеть IGS (International GNSS Service), составляют основу геодинимического полигона «Ulaanbaatar» (см. рис. 1). Полигон вытянут в широтном направлении на 100 км, в меридиональном на 80 км, в его центре находится горный массив Богд-Хан-Уул. Пункты полигона «Emeelt» установлены в пределах одноименной сейсмогенерирующей структуры на территории проявления продолжительного по времени роя слабых землетрясений. Эти разномасштабные полигоны связаны друг с другом двумя точками (EML7 и ULAB).

Для измерений использовались двухчастотные GPS-приемники марки Trimble 5700 с антеннами Zephyr TRM 39105.00 и мультчастотные ресиверы Sokkia GSR2700 ISX с внутренней GNSS-антенной Pinwheel™. С 2012 г. измерения на всех пунктах проводились с использованием многоканальных GNSS-приемников Trimble NetR9 с антеннами ChokeRing в комплекте, способными отслеживать сигналы всех существующих сейчас спутниковых систем.

При установке полевых антенн использовались оптические центриры. Измерения наклонной высоты производились сертифицированными мерными жезлами по окружности антенны в не менее чем трех точках, составляющих равнобедренный треугольник в плане. По этим данным вычислялась вертикальная высота до фазового центра антенны; уравнивание вертикальных высот антенн различных типов производилось с использованием таблиц фазовых центров антенн.

Измерения на точках полигона «Ulaanbaatar» проводились в течение 72 ч и более, а на полигоне «Emeelt» от 8 до 72 ч. При расчете скоростей современных движений реперов были использованы данные не менее чем четырех сессий наблюдений, проведенных в 2010—2015 гг. В разные годы измерения проводились на разных пунктах. Ошибки точности измерения координат реперов составляют не более 1 мм, что соответствует техническим характеристикам используемых ресиверов и принятым в расчете параметрам.

Обработка результатов GPS-измерений проводилась с использованием программного пакета GAMIT-GLOBK [Herring et al., 2015a]. С помощью метода двойных разностей получены: координаты региональных станций и их приращения, параметры движения спутников, 13 зенитных задержек для каждой станции, дата измерений, а также фазовые неопределенности. При получении решения использовались финальные орбиты спутников, полученные IGS [Beutler et al., 1993], параметры ориентации вращения Земли (IERS), таблицы зависимостей фазовых центров от азимута и угла прихода спутникового сигнала [Schmid et al., 2007], таблицы параметров Солнца и Луны, а также все материалы, рекомендованные IGS.

Путем визуального осмотра ежедневных временных рядов положения станций определялись разрывы или смещения, вызванные сменой антенн или приемников, а также сильными землетрясениями. При невозможности учета этих смещений в процессе вычисления скоростей некоторые периоды во временных рядах с нелинейным отклонением от фонового тренда были удалены. После этапа проверки временных рядов региональные решения объединялись с глобальными с использованием 31 станции, входящих в систему IGS (ARTU, BADG, BJFS, CHUM, FAIR, GRAZ, IISC, IRKT, KHAJ, KIT3, KOKB, KUNM, LHAZ, MAG0, NRIL, NVSK, ONSA, PETP, PETS, POL2, SELE, SHAO, TIDB, TIXI, TSKB, ULAB, URUM, USUD, WUHN, XIAN, YAKT). Это позволило повысить разрешение сигнала над уровнем шума и оптимально связать полученное нами решение с Международной земной системой отсчета (ITRF) [Altamimi et al., 2016]. Использование пакета GLOBK [Herring et al., 2015b] позволяет получить единое решение (позиция—скорость) путем объединения ежедневных решений глобальной (IGS) и региональной сетей (Ulaanbaatar), что позволило минимизировать отклонения в позициях и скоростях в эталонных (IGS) сетях и использовать для преобразования 12 параметров Хелмерта.

Полученное решение представляет собой набор координат реперов, их скоростей перемещений и приращений скоростей, выраженных в ITRF2014 [Altamimi et al., 2016] для сети GPS-пунктов полигона «Ulaanbaatar», а для GPS-пунктов полигона «Emeelt» в ITRF2008 [Altamimi et al., 2011].

Помимо определения векторов скорости для каждого пункта сети, рассчитывались скорости относительных горизонтальных деформаций. Методика расчетов основывалась на формулах из работы [Turcotte, Schubert, 2002]. Сходимость результатов вычислений по данным формулам с результатами, полученными с использованием программного пакета QOCA [Dong et al., 1998], была проверена на данных, представленных в работе [Лухнев и др., 2010].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчета скоростей горизонтальных движений по данным GPS-измерений на 12 пунктах полигона «Ulaanbaatar» за период 2010—2015 гг. приведены в табл. 1 и на рис. 3. В системе ITRF2014 векторы скоростей, полученных нами, согласованы с векторами постоянных GPS-пунктов сети IGS (например, с пунктом ULAB). В целом пункты смещаются на восток–юго-восток со скоростями 25—30 мм/год, азимут смещения в среднем составляет 105°. Самыми высокими значениями скоростей характеризуются пункты GUNJ и FERM — более 30 мм/год, наибольшими отклонениями в направлении движения от среднего — пункты GUNJ и HUST, азимуты векторов скоростей которых составляют 94° и 111° соответственно (см. рис. 3, а).

Более разнообразная ориентация векторов наблюдается при их расчете относительно Евразийской плиты (см. табл. 1, рис. 3, б). Большинство пунктов движутся по азимуту 130—150° со скоростью 2—4 мм/год. Выделяются два пункта, движущихся разнонаправленно и отличающихся наибольшими скоростями. Это пункт HUST, вектор для которого ориентирован на юго-запад, скорость смещения 3.8 мм/год, и пункт GUNJ, характеризующийся значительной относительной скоростью перемещения (6.8 мм/год) в направлении на северо-восток. Пункты HUAN, TERJ и ZNMD в Евразийской системе отсчета имеют низкие значения скорости перемещения и в сочетании с соответствующими погрешностями вычислений могут считаться условно неподвижными. Значение скорости для пункта ULAB несколько повышено (2.9 мм/год) относительно долгосрочных измерений (2.2 мм/год) [Лухнев, 2010] вследствие небольшого периода наблюдений на полигоне.

На рис. 3, б показаны изолинии значений векторов скоростей горизонтальных движений в пределах полигона «Ulaanbaatar». Хорошо видно, что в южной и юго-восточной частях полигона выделяется обширная по площади территория, характеризующаяся низкими значениями скоростей, тогда как области проявления высоких значений наблюдаются в северной и центральных частях.

На основании данных из табл. 1 были рассчитаны скорости относительных горизонтальных деформаций для 12 треугольников сети «Ulaanbaatar» (табл. 2, рис. 4). Скорости деформации для большей части сети составляют $(12—17) \cdot 10^{-8}$ год⁻¹, значения деформаций в остальных треугольниках колеблются в пределах $(3—8) \cdot 10^{-8}$ год⁻¹.

Таблица 1. Горизонтальные скорости GPS-станций сети полигона «Ulaanbaatar»

Пункт	Координаты, град.		В системе ITRF2014		Относительно Евразии (EU)		σ_{v_e}	σ_{v_n}	Вектор скоростей (EU)	
	в.д.	с.ш.	v_e	v_n	v_e	v_n			v , мм/год	азимут, град.
			мм/год		мм/год					
YLMT	106.613	47.502	26.81	-8.97	1.09	-2.08	0.29	0.33	2.35	152
WNDY	107.173	47.590	27.55	-6.76	1.89	0.27	0.29	0.33	1.91	82
LTUG	106.487	47.674	26.38	-8.24	0.67	-1.38	0.29	0.32	1.53	154
ZNMD	107.035	47.715	25.86	-7.01	0.21	-0.01	0.29	0.33	0.21	93
FERM	106.702	47.727	28.83	-9.51	3.15	-2.60	0.31	0.35	4.08	130
HUST	106.222	47.800	24.12	-10.26	-1.59	-3.47	0.52	0.58	3.82	205
ULAB	107.052	47.865	28.13	-8.49	2.5	-1.49	0.01	0.01	2.91	121
TERJ	107.430	47.886	24.43	-7.59	-1.17	-0.50	0.41	0.46	1.27	247
EML7	106.612	47.903	27.70	-10.36	2.03	-3.47	0.18	0.18	4.02	150
HUAN	107.240	47.986	25.05	-6.41	-0.55	0.63	0.50	0.57	0.84	319
GUNJ	107.111	48.019	30.24	-2.05	4.63	4.96	0.42	0.47	6.79	43
GUNT	106.744	48.082	27.44	-10.47	1.81	-3.55	0.29	0.33	3.98	153

Примечание. Здесь и в табл. 3: скорости: v_e — восточная, v_n — северная; σ — оценка ошибки по горизонтальным компонентам скорости; v — модуль вектора скорости.

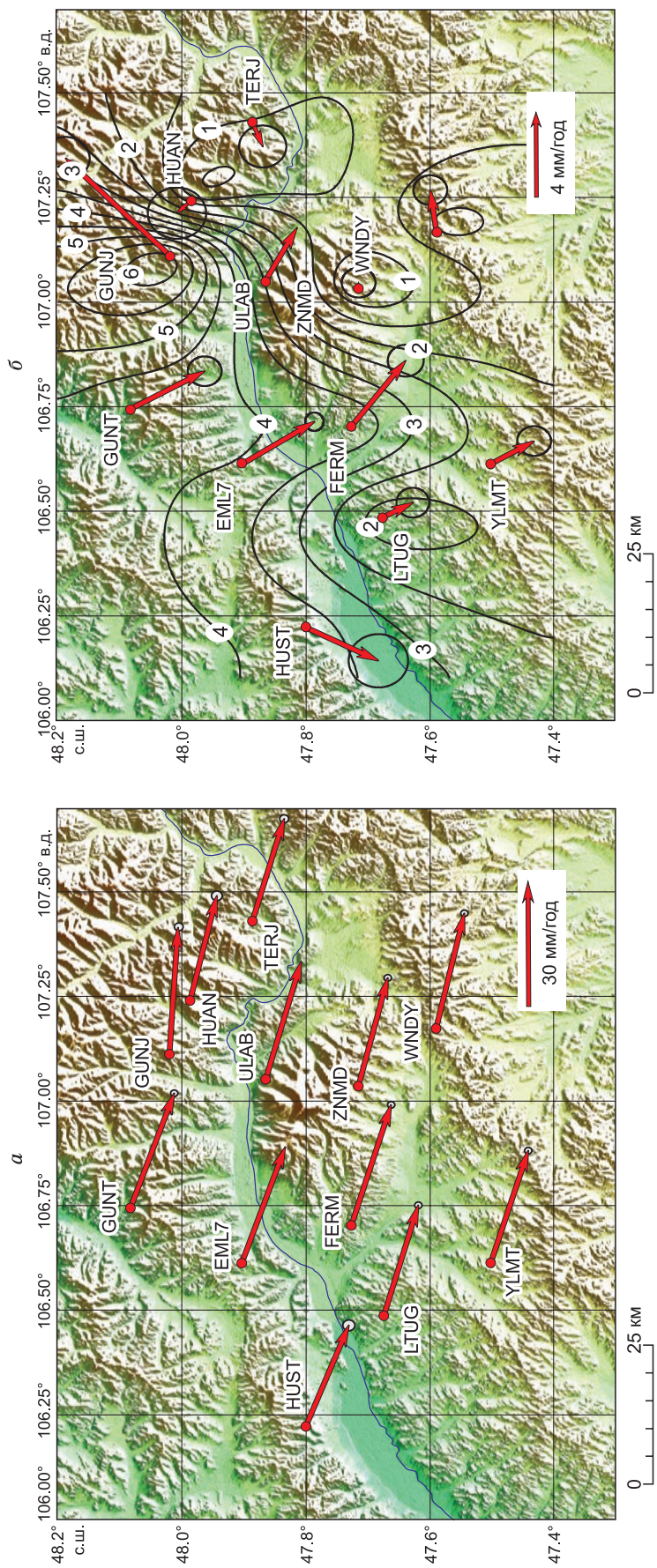


Рис. 3. Скорости горизонтальных движений пунктов полигона «Улаанбаатар» по данным GPS-измерений за период 2010—2015 гг.:

a — в системе ITRF2014, *б* — относительно Евразийской плиты. Стрелки — скорости горизонтальных движений. Эллипсы — 95%-е доверительные интервалы. Изолинии — модули вектора скорости (цифры на изолиниях — скорость в мм/год).

Таблица 2. Скорости относительных деформаций в пределах полигона «Ulaanbaatar»

Треугольник	Координаты центра треугольника		Скорость деформаций, 10^{-8} год ⁻¹		θ , град.
	в.д.	с.ш.	ϵ_1	ϵ_2	
HUST-FERM-EML7	106.512	47.811	12.77 ± 2.19	-3.95 ± 2.22	180 ± 6.7
HUST-YLMT-FERM	106.513	47.677	14.56 ± 1.82	-3.04 ± 2.08	170 ± 4.4
HUST-EML7-GUNT	106.526	47.929	16.99 ± 2.49	-1.70 ± 2.49	15 ± 12.6
EML7-FERM-GUNT	106.687	47.905	5.34 ± 1.27	-2.80 ± 1.3	178 ± 37.3
FERM-YLMT-ZNMD	106.784	47.649	2.88 ± 2.43	-19.01 ± 2.34	126 ± 3.9
ULAB-GUNT-FERM	106.833	47.892	-0.23 ± 0.93	-3.30 ± 1.13	338 ± 10.7
ULAB-FERM-ZNMD	106.930	47.770	1.66 ± 2.29	-22.36 ± 2.26	313 ± 2.9
YLMT-WNDY-ZNMD	106.941	47.603	5.28 ± 1.61	0.40 ± 1.62	32 ± 12.2
ULAB-HUAN-GUNT	107.012	47.978	3.08 ± 1.63	-10.05 ± 1.63	89 ± 6.2
ULAB-ZNMD-TERJ	107.173	47.823	-2.08 ± 2.86	-21.54 ± 2.75	127 ± 3.7
ZNMD-WNDY-TERJ	107.213	47.731	5.90 ± 1.46	-6.08 ± 2.11	215 ± 9.9
ULAB-TERJ-HUAN	107.241	47.913	13.95 ± 1.47	-12.84 ± 1.47	81 ± 5.4

Примечание. Здесь и в табл. 4: ϵ_1 — скорость максимального удлинения; ϵ_2 — скорость максимального укорочения; θ — азимут простираения оси максимальных деформаций укорочения (отсчитывается от направления на север).

Таблица 3. Горизонтальные скорости GPS-станций сети полигона «Emeelt»

Пункт	Координаты, град.		В системе ITRF2008		Относительно EML8		σ_{v_e}	σ_{v_n}	Вектор скоростей (EML8)	
	в.д.	с.ш.	v_e	v_n	v_e	v_n			v , мм/год	азимут, град.
			мм/год		мм/год		мм/год			
EML0	106.6079	47.9058	30.37	-5.66	11.16	0.46	1.29	1.28	11.17	88
EML4	106.6011	47.9115	22.42	-5.08	3.21	1.04	1.13	0.94	3.37	72
EML5	106.6117	47.9082	24.16	-6.54	4.95	-0.42	1.27	1.04	4.97	95
EML6	106.6002	47.9020	25.13	-9.59	5.92	-3.47	1.22	1.21	6.86	120
EML7	106.6126	47.9037	25.31	-10.58	6.10	-4.46	0.27	0.25	7.56	126
EML8	106.5734	47.9097	19.21	-6.12	0.00	0.00	0.66	0.67	0.00	0
EML9	106.6121	47.9191	21.41	-9.73	2.20	-3.61	0.72	0.80	4.23	149

Таблица 4. Скорости относительных деформаций в пределах полигона «Emeelt»

Треугольник	Координаты центра треугольника, град.		Скорость деформаций, 10^{-6} год ⁻¹		θ , град.
	в.д.	с.ш.	ϵ_1	ϵ_2	
EML8-EML6-EML9	106.595	47.910	3.4 ± 0.57	-1.0 ± 0.70	37 ± 6.4
EML6-EML7-EML4	106.605	47.906	5.5 ± 1.30	-0.4 ± 1.35	64 ± 7.8
EML6-EML7-EML9	106.608	47.908	2.3 ± 0.78	-1.2 ± 1.40	43 ± 13.4
EML4-EML7-EML9	106.609	47.916	4.9 ± 1.03	-3.4 ± 1.04	223 ± 5.4

Результаты показывают, что западная часть анализируемой триангуляционной сети подвержена преимущественно деформациям удлинения, оси которого ориентированы в субширотном направлении. Величина удлинения достигает значения $\epsilon_1 = 16.9 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹. Юго-восточная часть сети характеризуется превалированием деформаций укорочения, в основном ориентированных в северо-западном направлении. Величина скорости деформации укорочения минимальна в западной части полигона и возрастает в восточной, достигая величины $\epsilon_2 = 22.4 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹. Ориентация оси укорочения меняется от меридионального в западной части до северо-запад-юго-восточной в треугольниках, где она достигает максимальных значений. По периферии восточной части вновь увеличивается вклад растяжения, при этом ось удлинения ориентирована в северо-западных румбах.

Для локального полигона «Emeelt» также были рассчитаны скорости горизонтальных движений пунктов и скорости относительных горизонтальных деформаций земной коры (табл. 3, рис. 5). Векторы скоростей были рассчитаны в системе ITRF2008 и относительно пункта EML8, расположенного на удалении от разлома и остальных пунктов.

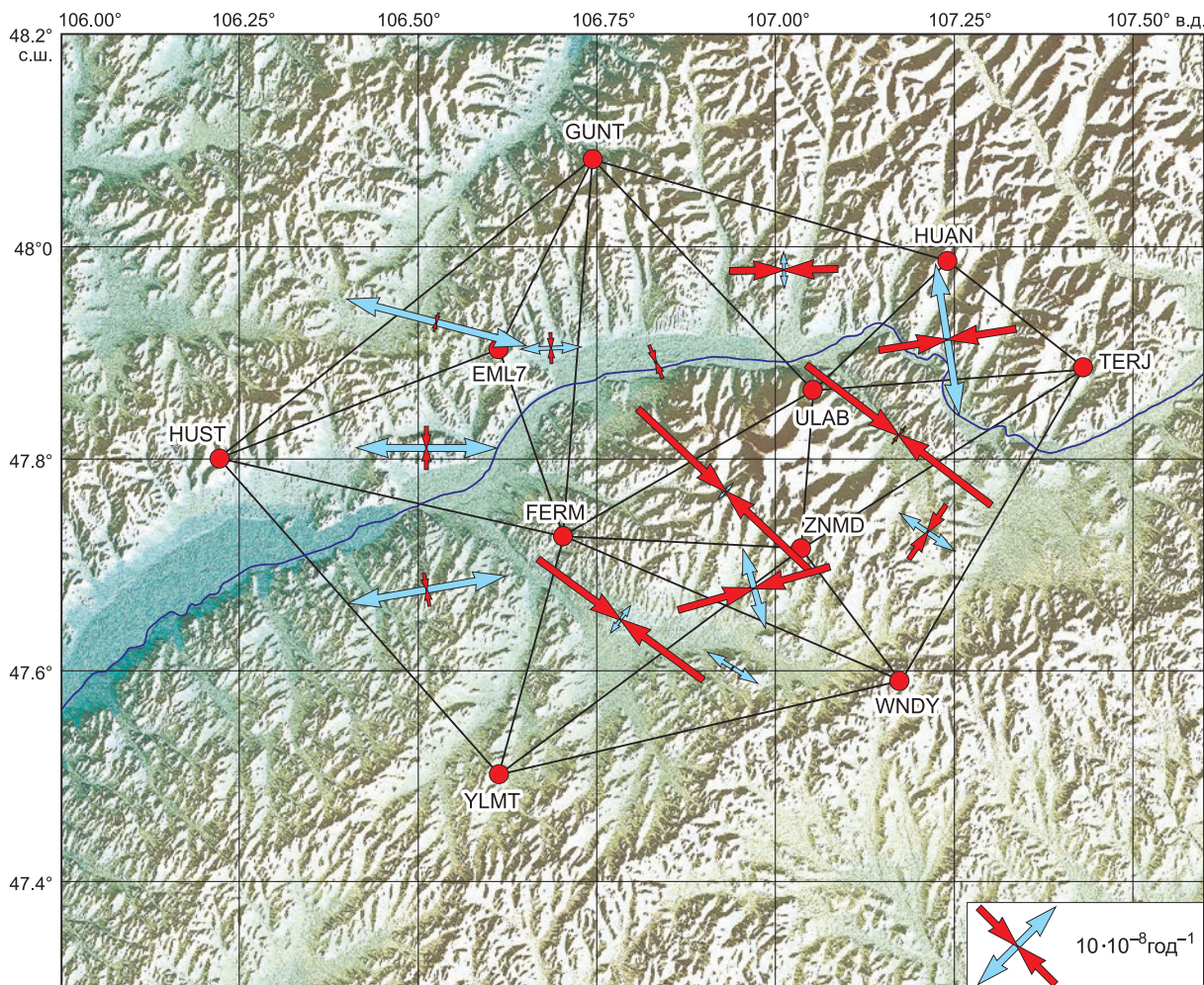


Рис. 4. Поле скоростей горизонтальных деформаций.

Красные стрелки — оси укорочения, голубые — оси удлинения. Тонкие черные линии, соединяющие GPS-пункты, — сеть триангуляции.

Наблюдаются значительные вариации горизонтальных скоростей в пределах сети, рассчитанных относительно пункта EML8. Наибольшей скоростью (11 мм/год) характеризуется пункт EML0, который заложен практически в осевой зоне разлома. Данный пункт, так же как и расположенный рядом EML5, движется в широтном направлении на восток. Пункты EML6 и EML7 имеют практически одинаковые скорости (7—8 мм/год) и азимуты перемещения (120°), хотя и характеризуют разные борта разлома. Вектор пункта EML9, являющегося самой северной точкой полигона, ориентирован больше к югу по сравнению с другими пунктами полигона; вероятно, данный пункт, будучи относительно удаленным территориально, уже не описывает смещения непосредственно в разломной зоне (см. рис. 5, а).

Относительные деформации в пределах четырех выделенных треугольных площадок (табл. 4, рис. 5, б) показывают удлинение земной коры в ЮВ-СЗ направлении и несколько меньшее по величине укорочение в ЮЗ-СВ румбах. Величина скорости удлинения достигает $5 \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$. Максимальными деформациями характеризуется осевая часть разлома, пересекающего полигон в СЗ направлении.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные являются первыми результатами измерений на GPS-полигонах в окрестностях Улан-Батора. Векторы скоростей в системе ITRF2014 показывают смещение пунктов в юго-восточном направлении, что согласуется с векторами постоянных GPS-пунктов сети IGS. При рассмотрении векторов скоростей относительно Евразии картина представляется более сложной. Наблюдается разброс векторов скоростей как по величине смещения, так и по азимуту. Обращает на себя внимание

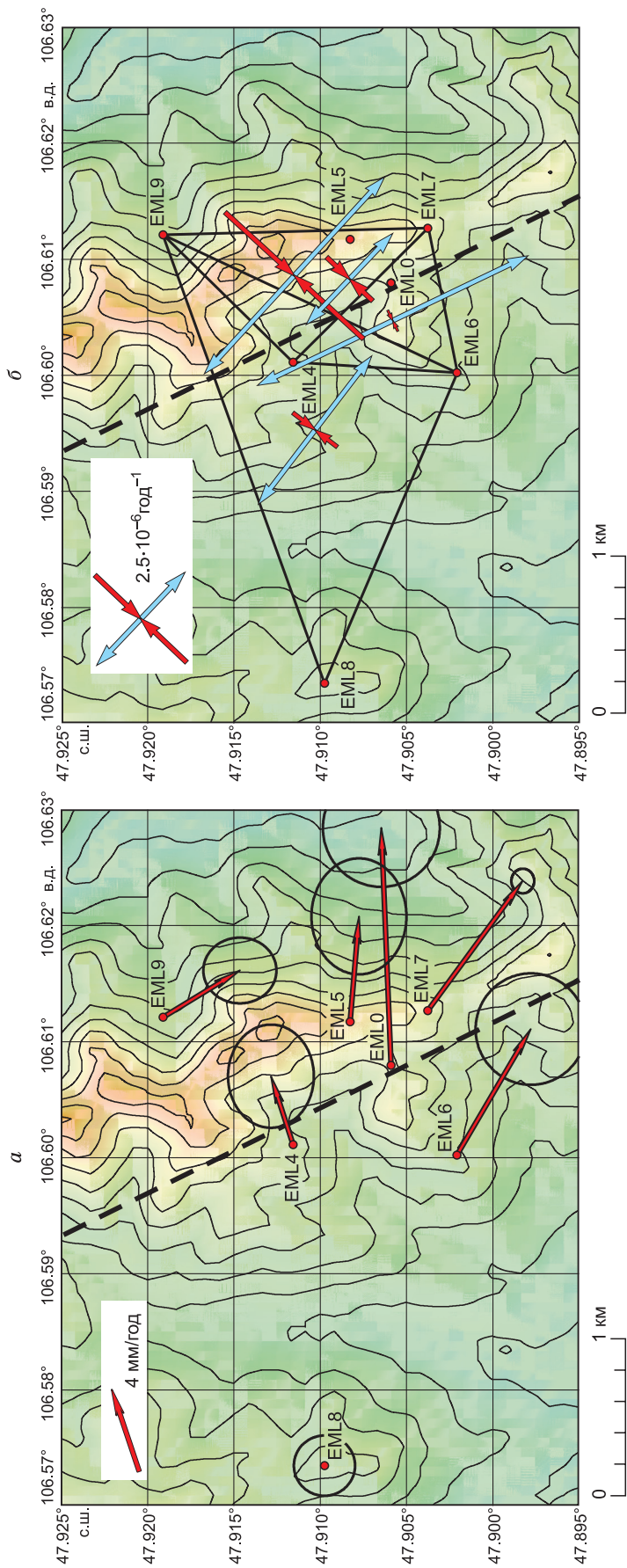


Рис. 5. Скорости горизонтальных движений GPS-пунктов (а) и поле горизонтальных деформаций полигона «Емелб» (б) по данным GPS-измерений за период 2010—2015 гг.

Красные стрелки — оси удлинения, голубые стрелки — оси укорочения, штриховой линией показано положение осевой зоны сейсмогенерирующей структуры Эмелг.

факт меньших скоростей для пунктов, расположенных в восточной части полигона. Именно замедление скоростей GPS-пунктов в юго-восточной части полигона и, следовательно, «набегание» на них пунктов северо-западной части полигона, смещающихся с большими скоростями, и приводит к тому, что в локальном масштабе здесь возникают деформации укорочения земной коры с осью, ориентированной СЗ—ЮВ. Следует, однако, помнить, что существует зависимость полученной картины деформаций от выбранных для расчета триангуляционных фигур, кроме того, в данном случае рассматривается достаточно локальная территория. В региональном же масштабе данная территория характеризуется субгоризонтальным сжатием, действующим в северо-восточном направлении при субгоризонтальном положении оси растяжения, ориентированной ЮВ-СЗ [Лухнев и др., 2010; Sankov et al., 2015; Radziminovich et al., 2016; Семинский и др., 2017].

Кинематика разломов вокруг Улан-Батора, определенная по сейсмогеологическим и геолого-структурным данным, также соответствует обстановке сдвига. Что касается ориентации оси сжатия, то разные исследователи определяют ее в зависимости от масштаба рассматриваемой территории или отдельных структур как ЮЗ-СВ [Семинский и др., 2017] или как от близкой к широтному до СЗ-ЮВ [Смекалин и др., 2013; Battsetseg, Ganzorig, 2017]. Последнее направление согласуется с локальной картиной ориентации осей деформаций по GPS-данным.

К северо-западу от Улан-Батора выделяется максимальное скопление эпицентров в виде полос СЗ простирания (рис. 6). Эта так называемая Эмелтская зона, возросшая сейсмическая активность которой

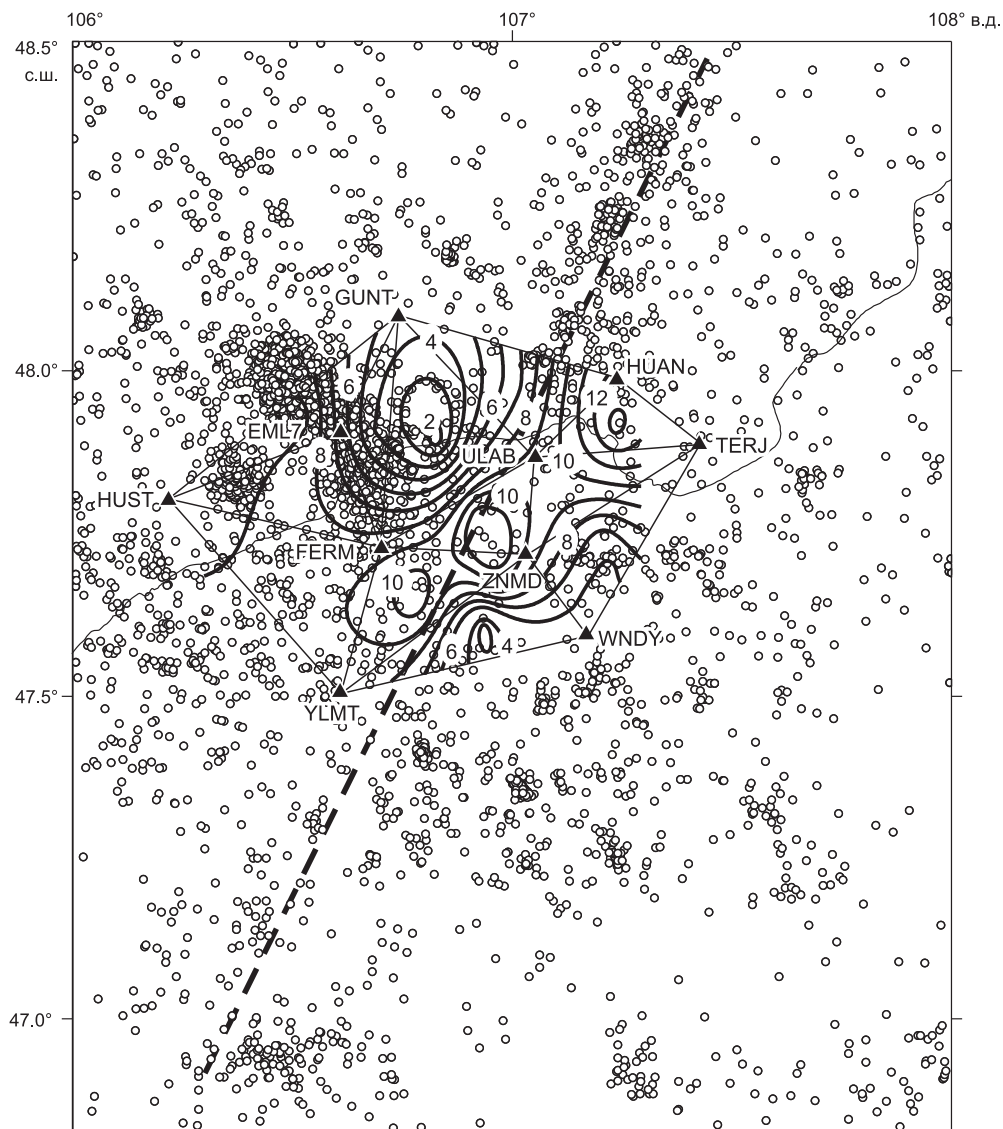


Рис. 6. Эпицентры землетрясений с магнитудами $M_L < 4$ в окрестностях г. Улан-Батор за период 1994—2015 гг.

Изолиниями показаны модули скорости максимальных сдвиговых деформаций (цифры на изолиниях даны в размерности 10^{-8} год $^{-1}$).

регистрируется с 2005 г. Одноименный разлом не имеет яркой выраженности в рельефе по сравнению с другими крупными разломами вблизи города, но проявлен в эманационном поле радона [Seminsky, Demberel, 2013]. Несмотря на высокую плотность эпицентров, магнитуда землетрясений Эмелтской зоны на сегодняшний день не превышает 4. Пункты локального полигона «Emeelt» расположены непосредственно в пределах сейсмогенерирующей структуры. Полученные высокие значения скорости деформаций обусловлены небольшой площадью полигона. Данные GPS-измерений показывают, что значение скорости деформации удлинения несколько превышает скорость деформации укорочения, что согласуется с механизмами очагов землетрясений, полученными в работе [Ganzorig, 2015]. Совпадает и ориентация главных осей (осей деформации в случае GPS и осей напряжений по фокальным решениям): северо-восточное—юго-западное сжатие (укорочение) и юго-восточное—северо-западное растяжение (удлинение).

Другие разломы не так отчетливо проявлены в современной сейсмичности, однако являются более крупными структурами и ярко выражены в рельефе и на космоснимках. Хустайский разлом протяженностью около 100 км отделяет Хустайский хребет от Тольской впадины (см. рис. 1). Генеральное простирание разломной зоны северо-восточное, но внутренняя структура разлома состоит из ряда кулис, простирание которых изменяется от субширотного до субмеридионального. По результатам тренчинга было оценено значение M_{\max} для Хустайского разлома как $M = 7.4$ [Смекалин и др., 2013]. По сейсмогеологическим данным кинематика различных сегментов разлома варьирует, однако преобладают взбросы со сдвиговой компонентой [Смекалин и др., 2013; Demberel et al., 2014], хотя, по мнению французских исследователей, вертикальная компонента является сбросовой [Ferry et al., 2010]. Деформации земной коры по GPS-данным указывают на субширотное удлинение земной коры на северо-восточном окончании разломной зоны, здесь же наблюдается сгущение эпицентров землетрясений. К сожалению, центральная по простиранию часть разлома осталась за пределами GPS-полигона. Вектор горизонтального движения единственного расположенного здесь пункта (HUST) направлен несогласно с остальными пунктами, что, возможно, связано с тем, что точка заложена в зоне разлома. Судя по относительному движению пунктов HUST, LTUG и деформациям в треугольнике HUST-FERM-EML7 подвижка по Хустайскому разлому должна иметь левостороннюю составляющую.

В зоне разлома Гунжин заложен и одноименный пункт GUNJ, который также движется в противоположном от большинства пунктов направлении, причем с максимальной по сравнению с другими точками скоростью. Подвижки по разлому привели к образованию сейсмодислокации северо-восточного простирания протяженностью 20—25 км. Разрыв в рельефе представлен в виде небольших линейных уступов или перегибов поверхности. Проведенные геолого-геофизические исследования позволили установить, что взбрососдвиговые подвижки по данному разлому могут вызывать землетрясения с магнитудой порядка 7.0 [Имаев и др., 2012]. Правосторонняя компонента сдвигового смещения по разлому СВ ориентации предполагает наличие широтных сжимающих напряжений. Такая кинематика подтверждается и GPS-данными: косое положение оси укорочения (широтной ориентации) по отношению к структуре СВ простирания.

Были оценены значения скоростей максимальных сдвиговых деформаций, рассчитанных по формуле: $\varepsilon_{\max} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$, где ε_1 — скорость максимального удлинения; ε_2 — скорость максимального укорочения. Наиболее высокие значения максимальных сдвиговых деформаций ($(10—14) \cdot 10^{-8}$ год⁻¹) образуют протяженную область в центре полигона, вытянутую в северо-восточном направлении, согласно с простиранием основных геологических структур. При сопоставлении с картой эпицентров (см. рис. 6) видно, что зона максимальных сдвиговых деформаций не совпадает с максимальным сгущением эпицентров в Эмелтской зоне, при этом следует иметь в виду, что их энергетическая представительность на сегодняшний день не превышает $M = 4.0$. Однако, если рассматривать территорию шире, то становится ясно, что зона максимальных деформаций, выявленная по GPS, расположена на продолжении полосы эпицентров, проходящей через полигон и вытянутой в ССВ направлении [One century..., 2000] от Дэренской субширотной сейсмоактивной структуры на юге до северных отрогов Хэнтэйского нагорья (черная штриховая линия, см. рис. 6). В этом же масштабе предыдущие GPS-измерения на пунктах Монголо-Байкальского региона примерно на меридиане Улан-Батора показывают изменение направления осредненных векторов с субширотного на юго-восточное (см. рис. 2). Для более полного понимания геодинамической ситуации становится очевидным необходимость установки GPS-пунктов к востоку от Улан-Батора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты анализа данных GPS-измерений на 18 полевых пунктах двух локальных геодинамических полигонов в течение 2010—2015 гг. Достигнута приемлемая точность измерений, что позволяет использовать данные для геодинамического анализа.

В системе ITRF2014 векторы скоростей согласованы между собой и с вектором постоянного пункта ULAB. В целом пункты смещаются на восток—юго-восток со скоростями 25—30 мм/год, азимут смещения в среднем составляет 105°. Эти параметры находятся в соответствии со скоростью движения перманентного пункта ULAB, относящегося к сети IGS и включенного в состав описываемых локальных полигонов. Относительно Евразии векторы для большинства пунктов несколько развернуты к югу, но также движутся на ЮВ по азимуту 130—150° со скоростью 2—4 мм/год. Выявлено расхождение векторов скоростей двух пунктов, расположенных на западном и северо-восточном замыканиях полигона «Ulaanbaatar». В результате проведенных исследований установлено уменьшение скоростей горизонтальных движений в пределах полигона «Ulaanbaatar» с северо-запада на юго-восток.

Неоднородность распределения скоростей в пределах исследуемой территории предопределяет зональное строение поля относительных горизонтальных деформаций. В западной части территории наблюдается вытянутая в меридиональном направлении зона с преобладанием величин относительных деформаций удлинения, оси которых ориентированы в субширотном направлении, величина удлинения составляет $\epsilon_1 = (12—16) \cdot 10^{-8}$ год⁻¹. В восточной части полигона наблюдаются деформации сжатия. Величины осей укорочения достигают $\epsilon_2 = 22.4 \cdot 10^{-8}$ год⁻¹, их ориентация СЗ-ЮВ в треугольниках, где она достигает максимальных значений. Наиболее высокие значения максимальных сдвиговых деформаций ($\epsilon_{\max} = (10—14) \cdot 10^{-8}$ год⁻¹) образуют протяженную область в центре полигона, вытянутую в северо-восточном направлении, согласно с простираем основных геологических структур. Для деформаций полигона «Emeelt» характерно удлинение земной коры в ЮВ-СЗ направлении и несколько меньшее по величине укорочение в ЮЗ-СВ румбах. Величина скорости удлинения достигает $5 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹. Максимальными деформациями характеризуется осевая часть разлома, пересекающего полигон в СЗ направлении.

Анализ результатов обработки измерений на GPS-пунктах геодинамических полигонов, позволяет констатировать, что параметры современных горизонтальных деформаций на исследуемой территории определяются суммарным воздействием общих геодинамических особенностей ее развития, геологическим строением региона и пространственным положением активных разломов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 17-05-00826_a, 16-05-00224).

ЛИТЕРАТУРА

Имаев В.С., Смекалин О.П., Стром А.Л., Чипизубов А.В., Сясько А.А. Оценка сейсмической опасности г. Улан-Батор (Монгольская Народная Республика) по результатам сейсмогеологических исследований // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (9), с. 1182—1193.

Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (7), с. 1006—1017.

Семинский К.Ж., Дэмбэрэл С., Тугарина М.А., Ганзориг Д., Борняков С.А. Первые оценки объемной активности почвенного радона в разломных зонах Центральной Монголии // ДАН, 2012, т. 447, № 2, с. 199—203.

Семинский К.Ж., Дэмбэрэл С., Мунгунсурен Д. Разломные зоны и поле напряжений в земной коре Уланбаторского геодинамического полигона (Монголия) на современном этапе тектогенеза // ДАН, 2017, т. 474, № 3, с. 336—341.

Смекалин О.П., Имаев В.С., Чипизубов А.В. Палеосейсмологические исследования в зоне Хустайского разлома (Северная Монголия) // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (7), с. 940—951.

Туруганов Е.Х., Арвисбаатар Н., Буянтогтох Б. Глубинное строение Улаанбаатарского района (Монголия) по гравиметрическим данным // Литосфера, 2015, № 4, с. 73—86.

Ульзибат М., Дугарма А. Активизация сейсмического процесса в районе Улаанбаатара // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Вып. 6: Труды VIII российско-монгольской конференции по астрономии и геофизике (17—18 октября 2009 г.). Иркутск, 2010, с. 85—93.

Altamimi Z., Collilieux X., Metivier L. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame // J. Geod., 2011, v. 85, № 8, p. 457—473.

Altamimi Z., Rebischung P., Metivier L., Xavier C. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // J. Geophys. Res.: Solid Earth, 2016, v. 121, № B8, p. 6109—6131, doi:10.1002/2016JB013098.

Battsetseg A., Ganzorig D. Primary estimation of the stress field orientation from focal mechanism of earthquakes around Ulaanbaatar // Строение литосферы и геодинамика: Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции с участием исследователей из других стран (Иркутск, 22—28 мая 2017 г.). Иркутск, ИЗК СО РАН, 2017, p. 283—285.

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., Likhnev 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.

Demberel S., Miroshnichenko A., Loukhnev A., Erdenezul D., Radziminovich N., Ulziibat M., Bayarsaikhan E., Red`kin A. GPS measurements in Ulaanbaatar and its vicinity // Abstracts of the XIX General Assembly of Asian Seismological Commission (Ulaanbaatar, 17–20 September 2012). 2012, p. 268—272.

Demberel S., Imaev V.S., Rogozhin E.A., Smekalin O.P., Ulziibat M., Chipizubov A.V. On a more precise assessment of seismic hazards for the city of Ulaanbaatar, Mongolia // Seism. Instrum., 2014, v. 50, № 2, p. 85—96.

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.

Dugarmaa T., Schlupp A. One century of seismicity in Mongolia map (1900–2000) // Proc. MAS, 2000, № 170, v. 4, p. 7—14.

Ferry M., Schlupp A., Ulzibat M., Munsch M., Fleury S., Baatarsuren G., Erdenezula D., Munkh-saikhan A., Ankhtsetseg D. Tectonic morphology of the Hustai fault (Northern Mongolia): a source of seismic hazard for the city of Ulaanbaatar // EGU 2010, Geophys. Res. Abstr., 2010, v. 12, p. 11122.

Ganzorig D. Focal mechanisms of earthquakes in the Emeelt swarm and around Ulaanbaatar city. Master's Thesis, MEE14604, National Graduate Institute for Policy Studies, Tokyo, Japan; International Institute of Seismology and Earthquake Engineering; Building Research Institute, Tsukuba, Japan. August, 2015, 21 p.

Geological map of Mongolia. Scale 1:1 000 000. Mineral resources authority of Mongolia. Mongolian Academy of Sciences. Institute of Geology and Mineral Resources. Ulaanbaatar, 1998.

Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. GAMIT reference manual. GPS analysis at MIT. Release 10.6, Mass. Inst. Technol., Cambridge, 2015a, 168 p.

Herring T.A., King R.W., Floyd M.A., McClusky S.C. GLOBK reference manual. Global Kalman Filter VLBI and GPS analysis program. Release 10.6, Mass. Inst. Technol., Cambridge, 2015b, 91 p.

One century of seismicity of Mongolia / Eds. T. Dugarmaa, A. Shlupp. RCAG MAS, Ulaanbaatar, 2000.

Radziminovich N., Bayaraa G., Miroshnichenko A., Demberel S., Ulziibat M., Ganzorig D., Likhnev A. Focal mechanisms of earthquakes and stress field of the crust in Mongolia and its surroundings // Geodyn. Tectonophys., 2016, v. 7, № 1, p. 23-38, doi:10.5800/GT-2016-7-1-0195.

Sankov V.A. Recent geodynamics of intracontinental areas: instrumental and geomorphological assessment of crustal movements and deformation in Central Asia // Geodyn. Tectonophys., 2014, v. 5, №1, p. 159—182, doi:10.5800/GT-2014-5-1-0122.

Sankov V.A., Parfeevets A.V., Miroshnichenko A.I., Sankov A.V., Bayasgalan A., Battogtokh D. Active faults paragenesis and the state of crustal stresses in the Late Cenozoic in Central Mongolia // Geodyn. Tectonophys., 2015, v. 6, № 4, p. 491—518, doi:10.5800/GT-2015-6-4-0191.

Schmid R., Steigenberger P., Gendt G., Ge M., Rothacher M. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas // J. Geod., 2007, v. 81, № 12, p. 781—798.

Seminsky K.Zh., Demberel S. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia // Radiat. Meas., 2013, v. 49, p. 19—34.

Turcotte D.L., Schubert G. Geodynamics. Cambridge, Cambridge University Press, 2002, 456 p.

Zhengyang Qiang, Qingju Wu, Yonghua Li, Mengtan Gao, Sodnomsambuu Demberel, Munkhuu Ulzibat, Usnikh Sukhbaatar, Lucy M. Flesch. Complicated seismic anisotropy beneath south-central Mongolia and its geodynamic implications // Earth Planet. Sci. Lett., 2017, v. 465, p. 126—133.

Рекомендована к печати 22 июля 2017 г.

А.Д. Дучковым

Поступила в редакцию 30 мая 2017 г.

после доработки — 14 июля 2017 г.