

## СОВРЕМЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ СЕКМЕНТОВ РИФТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ ПО ДАННЫМ GPS ГЕОДЕЗИИ

А.В. Лухнев<sup>1</sup>, В.А. Саньков<sup>1,2</sup>, А.И. Мирошниченко<sup>1</sup>, С.В. Ашурков<sup>1</sup>, Л.М. Бызов<sup>1</sup>,  
А.В. Саньков<sup>1</sup>, Ю.Б. Башкуев<sup>3</sup>, М.Г. Дембелов<sup>3</sup>, Э. Кале<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет, 664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия

<sup>3</sup> Институт физического материаловедения СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

<sup>4</sup> Purdue University, West Lafayette, IN 47907-1397, USA

На основе многолетних измерений современных движений в центральной части Байкальской рифтовой системы получены данные о кинематике горизонтальных движений, скорости относительных горизонтальных деформаций и скорости вращений в пределах области сочленения Южно-Байкальской, Северо-Байкальской и Баргузинской рифтовых впадин, которая представляет собой сложную структуру с двумя трансферными зонами — Ольхонско-Святоносской и Усть-Баргузинской. Показано, что движение блоков происходит в ЮВ направлении, перпендикулярно структурам трансферных зон и под острым углом по отношению к общему простиранию Байкальского рифта, что отвечает условиям правостороннего сдвигораздвига по главной структуре. Средние значения скоростей увеличиваются от 3.0 мм · год<sup>-1</sup> в северной части Южно-Байкальской впадины до 6.5 мм · год<sup>-1</sup> — в Баргузинской. Оси удлинения, которые преобладают в пределах района исследований, в среднем имеют СЗ-ЮВ направление. Области повышенных деформаций тяготеют к структурам с высоким уровнем сейсмической активности в Южно-Байкальской и, отчасти, в Баргузинской впадинах, что подтверждает существование современной зоны деструкции земной коры в Байкальской рифтовой системе, которая представляется наиболее вероятным источником сильных землетрясений будущего.

В поле скоростей вращения земной поверхности выделяются две зоны с разнонаправленным вращением. Правостороннее (по часовой стрелке) вращение характерно для структур ССВ простирания (Маломорская впадина, южная часть Северо-Байкальской впадины, поднятие Баргузинского хребта). Левостороннее (против часовой стрелки) вращение получено для структур СВ простирания (северная часть Южно-Байкальской впадины, южная часть Баргузинской впадины).

В целом полученные данные показывают сложную картину современных горизонтальных смещений и деформаций в пределах области сочленения рифтовых структур СВ и ССВ простирания, подчеркивая потенциальную возможность реализации в их пределах соответственно левосторонних и правосторонних сдвиговых движений по разломам.

*GPS, скорости тектонических движений, деформации земной коры, вращения, относительные деформации.*

### GPS-MEASUREMENTS OF RECENT CRUSTAL DEFORMATION IN THE JUNCTION ZONE OF THE RIFT SEGMENTS IN THE CENTRAL BAIKAL RIFT SYSTEM

A.V. Lukhnev, V.A. San'kov, A.I. Miroshnichenko, S.V. Ashurkov, L.M. Byzov,  
A.V. San'kov, Yu.B. Bashkuev, M.G. Dembelov, and E. Calais

Based on multiyear measurements of present-day motions in the central area of the Baikal rift system, new data on the kinematics of horizontal motions, relative horizontal deformation rates, and rotation velocities in the area of junction of the South Baikal, North Baikal, and Barguzin rift basins have been obtained. This area is an intricate structure with two transfer zones: Ol'khon-Svyatoi Nos and Ust'-Barguzin. It is shown that crustal blocks are moving southeastward, normally to the structures of transfer zones and at an acute angle to the Baikal Rift strike, which corresponds to the right-lateral strike-slip extensional faulting along the major structure. The average horizontal velocities increase from 3.0 mm yr<sup>-1</sup> in the northern South Baikal basin to 6.5 mm yr<sup>-1</sup> in the Barguzin basin. The elongation axes prevailing in the study region are mainly of NW-SE direction. The areas of intense deformations are confined to structures with high seismic activity in the South Baikal and, partly, Barguzin basins. This confirms the existence of a present-day zone of the Earth's crust destruction in the Baikal rift system, which is the most likely source of strong earthquakes in the future. Two zones with rotations in opposite directions are recognized in the rotation velocity field. Clockwise rotation is typical of structures of N-NE strike (Maloe More basin, southern North Baikal basin, Barguzin Ridge rise). Counterclockwise rotation

is determined for NE-striking structures (northern South Baikal basin, southern Barguzin basin). In general, the obtained data show an intricate pattern of present-day horizontal dislocations and deformations in the area of junction of NE- and N–NE-striking rift structures. This suggests left- and right-lateral strike-slip faults, respectively, within them.

*GPS, velocity field, Earth's crustal deformations, strain rates*

## ВВЕДЕНИЕ

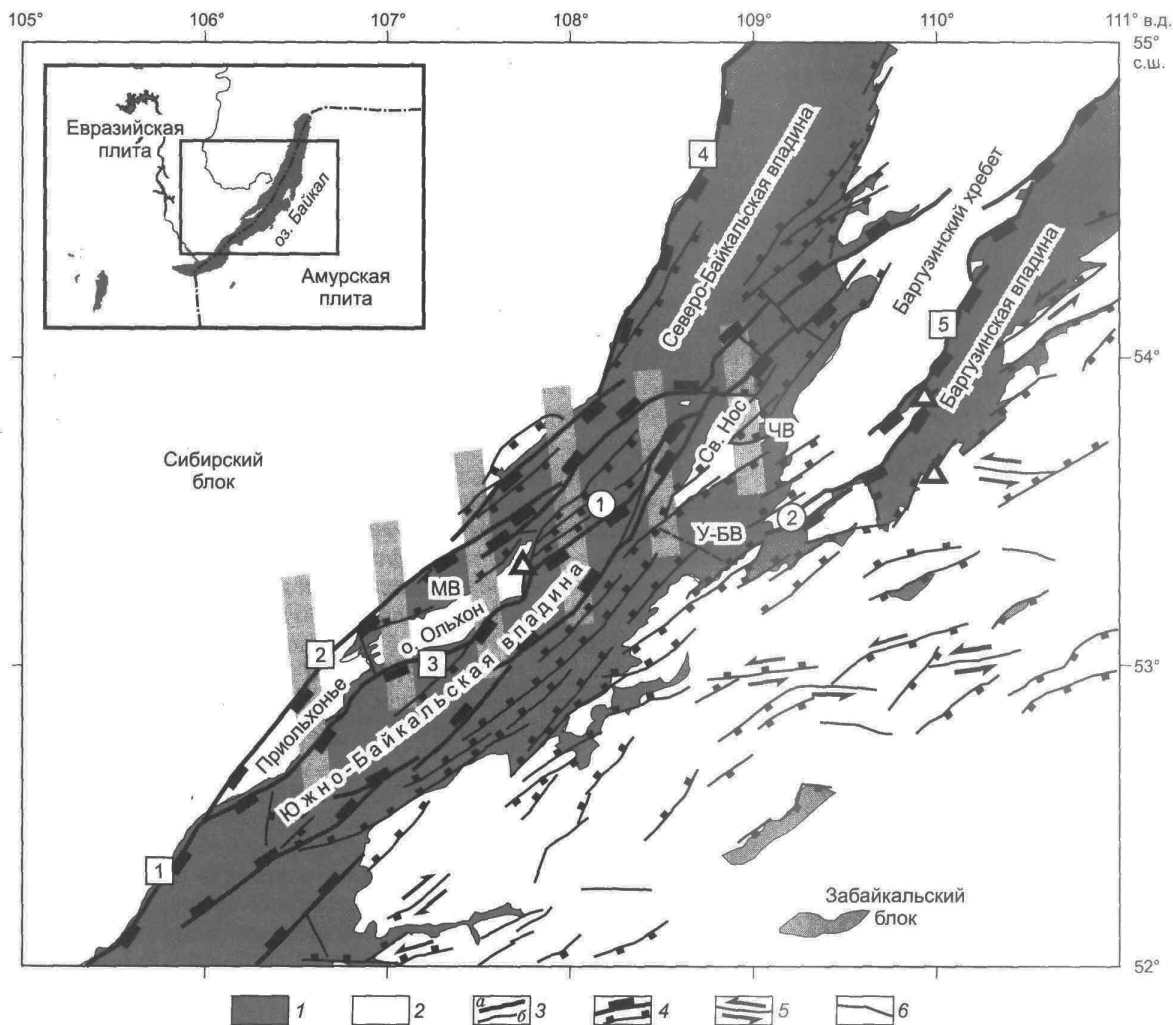
Несмотря на относительную однородность современного поля тектонических напряжений, центральная часть Байкальской рифтовой системы является достаточно сложной тектонической зоной, что обусловлено сочетанием здесь нескольких структурных элементов. В своих работах академик Н.А. Логачев [Логачев, 2001] доказывал наличие двух главных составных элементов Байкальской впадины — Южно-Байкальской и Северо-Байкальской рифтовых впадин (рис. 1). Он особо подчеркивал роль Ольхонско-Святоносской межвпадинной перемычки, которая является зоной аккомодации для указанных структурных элементов. Она состоит из серии кулисно подставляющих друг друга грабенов (полуграбенов) и горстов северо-восточного простирания — Маломорской впадины, Ольхонского горста и горста хр. Академический, Морского грабена, Святоносского горста и Чивыркуйской впадины. Сложное тектоническое строение зоны аккомодации предполагает и непростой характер распределения деформаций внутри нее. В дополнение к этому в районе Баргузинского залива рифтовая система дихотомирует, разделяясь на две ветви — Северо-Байкальскую и Баргузинскую. Согласно расчетам и выводам из работы [Petit, Deverchere, 2006], расширение рифтовой системы к северо-востоку обусловлено пониженными прочностными свойствами литосферы Саяно-Байкальской горной области по отношению к платформенной литосфере. Таким образом, тектонический узел в районе центральной части Байкальской впадины и ее сочленения с Баргузинской впадиной интересен с точки зрения изучения закономерностей распределения деформаций и перехода от условий «сосредоточенного» к условиям «рассредоточенного» рифтинга.

На сегодняшний день основными индикаторами активно протекающих деформаций в этом районе служат современная сейсмичность и участки голоценовой сейсмогенной активизации разломов — палеосейсмодислокации. Судя по структуре поля эпицентров землетрясений, наиболее активными являются разломы Морского грабена (рис. 2, а). Практически отсутствует сейсмичность в Маломорской впадине и в южной части Северо-Байкальской впадины севернее 54 параллели. Слабо сейсмически активны южная часть Баргузинской впадины и район восточного берега Баргузинского залива. Вместе с тем наличие следов сильных землетрясений недавнего прошлого (последние 10—12 тыс. лет) говорит о высоком сейсмическом потенциале этих территорий [Сейсмическое..., 1977] и пространственно-временном перераспределении максимумов тектонических деформаций на территории зоны аккомодации. Часть активных разломов скрыта под водной линзой Байкала, однако данные сейсмического профилирования позволяют говорить об их активной жизни в отдельные периоды развития Байкальской впадины [Hutchinson et al., 1992; Мац и др., 2001].

В настоящей статье нами поставлена задача рассчитать и проанализировать характеристики современных тектонических деформаций регионального масштаба в пределах зоны сочленения Северо-Байкальской, Южно-Байкальской и Баргузинской впадин и сопоставить их с результатами изучения напряженно-деформированного состояния района по сейсмологическим и геолого-структурным данным.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для получения сведений о кинематике современных блоковых движений, выявления закономерностей распределения активных деформаций в пределах центральной части Байкальского рифта нами использованы данные измерений в пределах Байкальского геодинамического полигона с применением метода спутниковой геодезии (GPS-технология). Сеть пунктов охватывает краевую часть блока Сибирской платформы, Приольхонье и о. Ольхон, п-ов Святой Нос и восточный борт Байкальской впадины, а также южную и центральную части Баргузинской впадины. Измерения начаты в 1994 г. Поле скоростей горизонтальных движений GPS пунктов центральной части Байкальского геодинамического полигона было получено с помощью программного пакета GAMIT/GLOBK [King, Bock, 2006]. Методика и процедуры расчетов схожи с изложенными в работе [Лухнев и др., 2010]. Кроме этого, в системе отсчета ITRF2008 проведено уравнивание региональной GPS-сети с сетью IGS станций, относящихся к глобальной сети [Altamimi et al., 2011]. Для получения скоростей относительных деформаций матрицы скорости горизонтальных движений и их приращений обрабатывались программным пакетом QOCA [Dong et al., 1998].



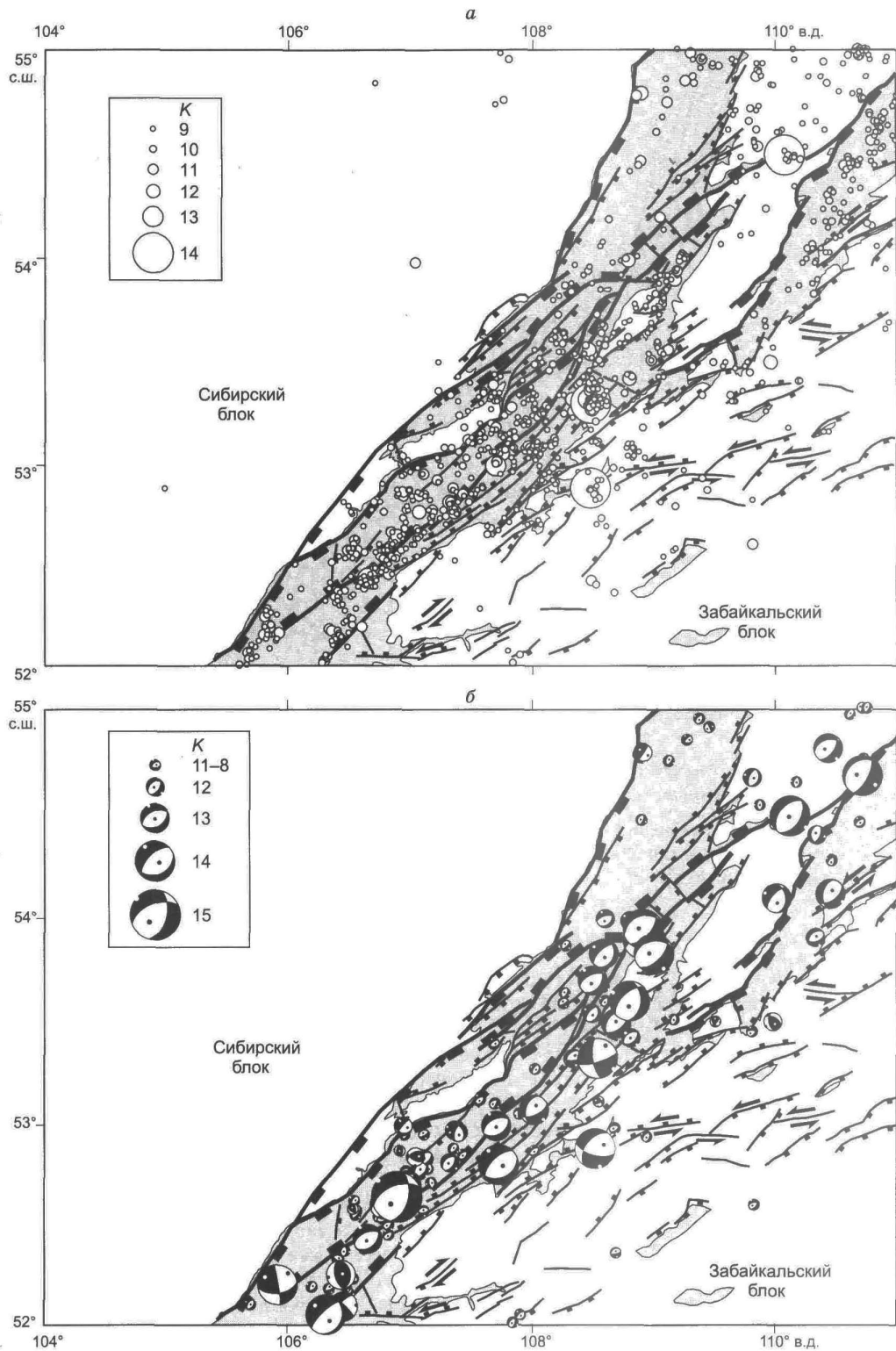
**Рис. 1. Неотектоническая разломно-блоковая структура центральной части Байкальской рифтовой системы.**

Цифрами в квадратах обозначены главные разломы: 1 — Обручевский, 2 — Приморский, 3 — Морской (Ольхонский), 4 — Северо-Байкальский, 5 — Баргузинский. Цифрами в кругах обозначены Ольхонно-Святоноская (1) и Усть-Баргузинская (2) трансферные зоны. МВ — Маломорская впадина, ЧВ — Чивыркуйская впадина, У-БВ — Усть-Баргузинская впадина. Серией широких серых полос выделена Ольхонно-Святоноская зона аккомодации. На врезке — положение района исследований.

1 — осадки и вода озер, заполняющие рифтовые впадины; 2 — породы фундамента; 3 — рифтовые разломы: а — главные, б — второстепенные; 4—б — кинематика разломов: 4 — сбросы, 5 — сдвиги, 6 — разломы с неустановленным типом смещений.

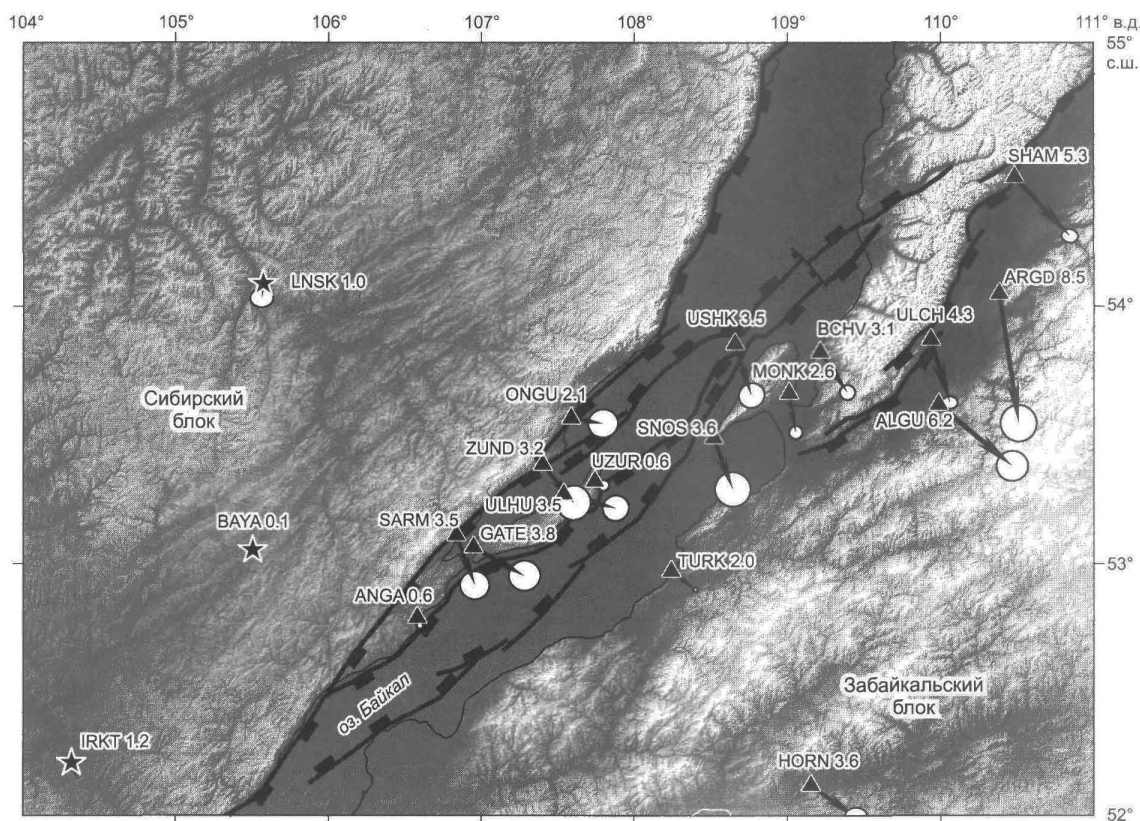
На рис. 3 показано региональное поле скоростей современных движений земной коры центральной части Байкальского рифта, рассчитанное относительно условно неподвижных пунктов IRKT, BAYА и LNSK, характеризующихся скоростями горизонтальных движений в пределах  $1 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$  и расположенных в пределах Сибирского блока Евразийской плиты.

В региональном отношении основной чертой современной кинематики движений является юго-восточное направление векторов перемещения пунктов со средней скоростью в  $3 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$  (см. рис. 3, табл. 1). В пределах Ольхонского блока векторы направлены более к востоку, в среднем по азимуту  $113^\circ$ , нежели векторы пунктов, расположенных на западном борту Маломорской впадины, где их среднее направление движения имеет азимут  $154^\circ$ . Скорости пунктов в районе Маломорской впадины закономерно уменьшаются в северо-восточном направлении. Святоносский блок представлен четырьмя пунктами с выдержанной ориентировкой векторов движений по азимуту  $160^\circ$  и средней скоростью  $3.2 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ . Скорости горизонтальных движений геодезических пунктов, расположенных в южной час-



**Рис. 2. Сейсмичность центральной части Байкальской рифтовой системы.**

*a* — поле эпицентров землетрясений с  $K \geq 9$  за период с 1962 по 2012 год (по данным Байкальского филиала ГС СО РАН), *б* — механизмы очагов землетрясений (квадранты сжатия показаны черным цветом, а области растяжения — белым на верхней полусфере), по данным [Солоненко и др., 1993; Мельникова, Радзиминович, 1998; Землетрясения..., 2003—2008; <http://www.globalcmt.org/>, <http://neic.usgs.gov/>, <http://www.seis-bykl.ru/>].



**Рис. 3.** Поле скоростей современных горизонтальных движений центральной части Байкальской рифтовой системы по данным измерений методом GPS геодезии за период с 1994 по 2011 г.

Звездочками и треугольниками показаны пункты Байкальского GPS полигона с аббревиатурами их названий и векторами скоростей (стрелки с эллипсами 95 %-го доверительного интервала). Звездочки — пункты локальной системы отсчета, расположенные в пределах стабильного Сибирского блока.

ти Баргузинской впадины, увеличиваются практически в два раза и составляют в среднем  $6.1 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$ . Направления векторов в этом районе остаются схожими с направлениями векторов в центральной части Байкальской впадины.

Поле скоростей относительных горизонтальных деформаций (рис. 4) характеризуется преобладанием условий горизонтального удлинения земной поверхности с подчиненным значением других типов деформаций. По направлению максимального удлинения по отношению к простираению рифтовых структур и типу горизонтальных деформаций можно выделить несколько групп районов (см. рис. 4, табл. 2). Удлинение в СЗ-ЮВ направлении, типичное для центральной части Байкальской рифтовой системы, преобладает в северной части Южно-Байкальской впадины, в Усть-Баргузинской и Баргузинской впадинах, а также в северной части Маломорской впадины и в районе подводной части Ольхонско-Святоносской перемычки. При этом, как правило, наблюдается укорочение земной поверхности в СВ-ЮЗ направлении. Соотношение величин удлинения и укорочения меняется от района к району. В пределах блока Приольхонья и южной части Ольхонского блока, а также в северной части Маломорской впадины и южной части блока п-ова Святой нос, скорости деформаций сопоставимы по величине, что можно интерпретировать как наличие условия сдвига. В южной части Баргузинской впадины скорость укорочения в СВ-ЮЗ направлении даже несколько преобладает над удлинением. Преобладают скорости деформаций со значениями  $3\text{--}4 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$  (см. рис. 4, табл. 2). Максимальные значения скорости относительно удлинения «байкальского типа» наблюдаются в районе Баргузинского залива и в южной части Баргузинской впадины — до  $10^{-7} \text{ год}^{-1}$ .

Выделяются два района с нетипичным для Байкальского рифта направлением удлинения — в направлении СВ-ЮЗ. Это — Маломорская впадина и районы северной Ольхонско-Святоносской пере-



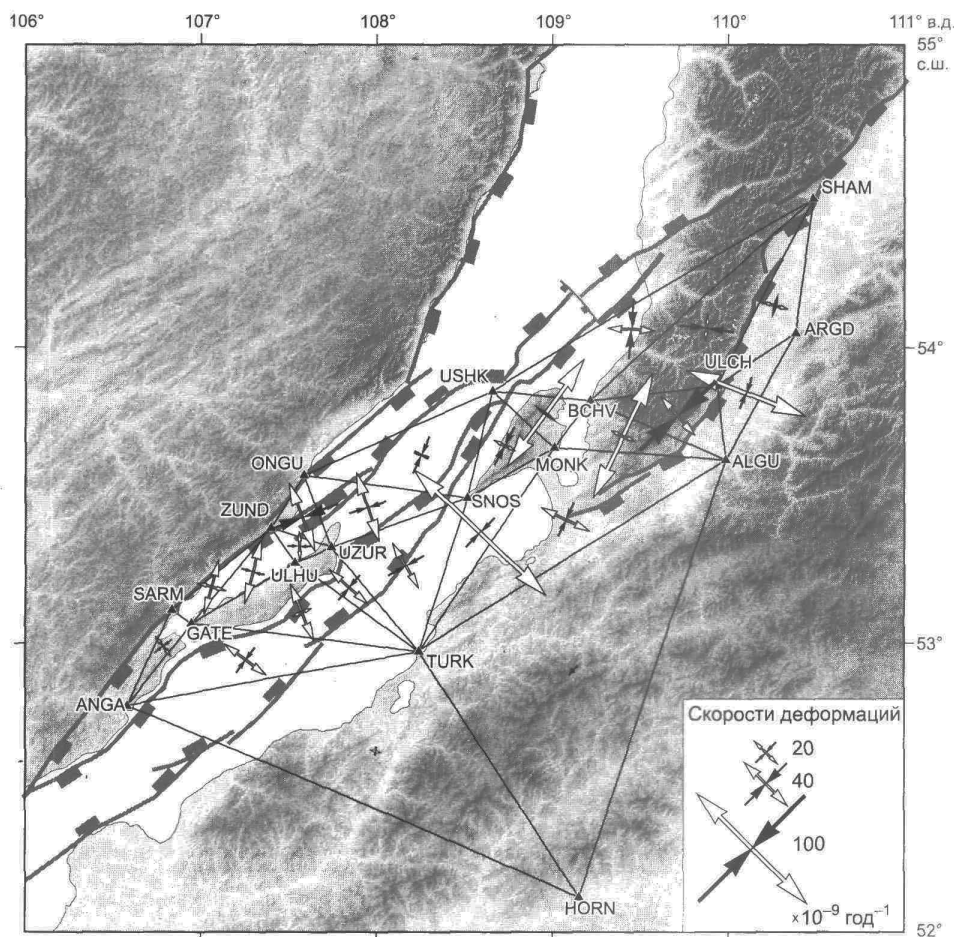
Таблица 1. Скорости современных горизонтальных движений пунктов Байкальского геодинимического полигона по данным измерений за 1994—2011 гг.

№	Координаты, град.		Скорость, мм · год <sup>-1</sup>		Коэффициент корреляции	Станция	Вектор	
	в.д.	с.ш.	восточная	северная			скорость, мм · год <sup>-1</sup>	азимут, град.
1	106.58	52.79	0.18 ± 0.15	-0.53 ± 0.15	0.009	ANGA	0.6	161.2
2	106.84	53.11	1.22 ± 0.66	-3.27 ± 0.63	-0.010	SARM	3.5	159.5
3	107.40	53.39	2.04 ± 0.76	-2.51 ± 0.78	0.021	ZUND	3.2	140.9
4	107.59	53.57	2.07 ± 0.67	-0.35 ± 0.63	0.019	ONGU	2.1	99.6
5	106.95	53.07	3.33 ± 0.71	-1.88 ± 0.68	0.007	GATE	3.8	119.4
6	107.54	53.27	3.41 ± 0.59	-0.91 ± 0.58	0.031	ULHU	3.5	104.9
7	107.74	53.33	0.56 ± 0.25	-0.27 ± 0.25	0.030	UZUR	0.6	115.7
8	108.52	53.49	1.24 ± 0.80	-3.37 ± 0.78	-0.015	SNOS	3.6	159.8
9	108.66	53.86	1.07 ± 0.58	-3.33 ± 0.55	0.050	USHK	3.5	162.2
10	109.01	53.67	0.43 ± 0.30	-2.52 ± 0.30	0.014	MONK	2.6	170.3
11	109.21	53.82	1.76 ± 0.34	-2.59 ± 0.33	0.005	BCHV	3.1	145.8
12	110.48	54.50	3.61 ± 0.37	-3.87 ± 0.31	-0.076	SHAM	5.3	136.9
13	110.38	54.05	1.26 ± 0.81	-8.41 ± 0.81	-0.009	ARGD	8.5	171.5
14	109.98	53.62	4.80 ± 0.71	-4.00 ± 0.68	0.004	ALGU	6.2	129.8
15	109.94	53.87	1.23 ± 0.34	-4.09 ± 0.28	-0.034	ULCH	4.3	163.3
16	109.15	52.12	2.92 ± 0.51	-2.06 ± 0.46	0.044	HORN	3.6	125.2
17	108.24	52.97	1.55 ± 0.12	-1.19 ± 0.10	-0.036	TURK	2.0	127.5
18	105.57	54.09	-0.12 ± 0.52	-1.03 ± 0.42	0.018	LNSK	1.0	186.6
19	104.32	52.22	0.41 ± 0.07	-1.16 ± 0.05	-0.073	IRKT	1.2	160.5
20	105.50	53.06	0.05 ± 0.15	-0.02 ± 0.15	0.010	BAYA	0.1	111.8

Таблица 2. Скорости современных относительных горизонтальных деформаций и вращений земной поверхности в пределах Байкальского геодинимического полигона

№	Координаты центра, град.		$\varepsilon_1 \cdot 10^{-9}$ год <sup>-1</sup>	$\varepsilon_2 \cdot 10^{-9}$ год <sup>-1</sup>	$\Omega \cdot 10^{-9}$ град. год <sup>-1</sup>	$\theta$ град.	Станции
	в.д.	с.ш.					
1	109.08	53.42	34.6 ± 2.9	-23.8 ± 1.8	-22.3 ± 1.7	26.2 ± 1.7	ALGU-MONK-TURK
2	108.73	53.67	15.2 ± 4.6	-28.4 ± 3.4	29.2 ± 2.8	27.8 ± 3.7	MONK-SNOS-USHK
3	110.27	54.14	16.5 ± 7.1	10.9 ± 2.2	23.3 ± 3.7	14.6 ± 38.5	ARGD-SHAM-ULCH
4	110.10	53.85	82.1 ± 7.5	-21.4 ± 2.9	-22.8 ± 4.1	20.7 ± 2.2	ALGU-ARGD-ULCH
5	108.96	53.78	86.4 ± 6.5	11.7 ± 4.2	10.4 ± 3.9	125.8 ± 2.9	BCHV-MONK-USHK
6	107.56	53.33	19.5 ± 12.1	-14.9 ± 7.1	36.4 ± 7.0	88.3 ± 11.7	ULHU-UZUR-ZUND
7	108.59	53.38	118.0 ± 7.3	-27.2 ± 2.2	10.6 ± 3.8	43.6 ± 1.5	MONK-SNOS-TURK
8	109.71	53.77	33.8 ± 3.6	-66.8 ± 4.7	-17.6 ± 2.9	48.0 ± 1.7	ALGU-BCHV-ULCH
9	109.40	53.70	89.8 ± 6.9	16.5 ± 2.7	22.9 ± 3.7	115.5 ± 2.9	ALGU-BCHV-MONK
10	109.87	54.06	17.3 ± 2.9	-35.5 ± 3.6	41.7 ± 2.3	96.8 ± 2.5	BCHV-SHAM-ULCH
11	109.45	54.06	30.6 ± 3.7	-39.3 ± 4.7	-19.5 ± 2.9	3.6 ± 2.4	BCHV-SHAM-USHK
12	106.79	52.99	25.6 ± 14.4	-22.6 ± 5.9	-2.3 ± 7.8	51.9 ± 9.3	ANGA-GATE-SARM
13	108.25	53.64	-9.7 ± 2.8	-26.4 ± 3.1	21.5 ± 2.1	24.0 ± 7.2	ONGU-SNOS-USHK
14	107.84	53.19	33.7 ± 2.2	-21.4 ± 10.6	2.9 ± 5.4	40.9 ± 5.6	TURK-ULHU-UZUR
15	107.58	53.10	40.4 ± 3.9	13.8 ± 2.8	-3.7 ± 2.4	66.8 ± 5.1	GATE-TURK-ULHU
16	108.17	53.26	34.3 ± 2.7	-27.1 ± 2.5	-15.9 ± 1.8	59.8 ± 1.7	SNOS-TURK-UZUR
17	107.06	53.19	36.2 ± 8.2	19.2 ± 13.5	6.6 ± 7.9	104.9 ± 26.6	GATE-SARM-ZUND
18	107.29	53.24	43.9 ± 5.6	-15.7 ± 7.5	22.9 ± 4.6	104.7 ± 4.5	GATE-ULHU-ZUND
19	107.58	53.43	47.6 ± 4.8	-48.9 ± 6.5	0.2 ± 4.1	69.1 ± 2.4	ONGU-UZUR-ZUND
20	107.95	53.46	47.7 ± 4.9	-25.3 ± 2.5	-3.0 ± 2.7	71.6 ± 2.2	ONGU-SNOS-UZUR
21	107.26	52.94	33.8 ± 3.5	-20.3 ± 3.7	-15.3 ± 2.5	36.4 ± 2.7	ANGA-GATE-TURK

Примечание.  $\varepsilon_1$  — скорость максимального удлинения;  $\varepsilon_2$  — скорость максимального укорочения;  $\Omega$  — скорость вращения;  $\theta$  — азимут простираения оси максимальных деформаций укорочения (отсчитывается от направления на север, положительные значения в восточных румбах, отрицательные — в западных).



**Рис. 4.** Поле скоростей относительных горизонтальных деформаций центральной части Байкальской рифтовой системы.

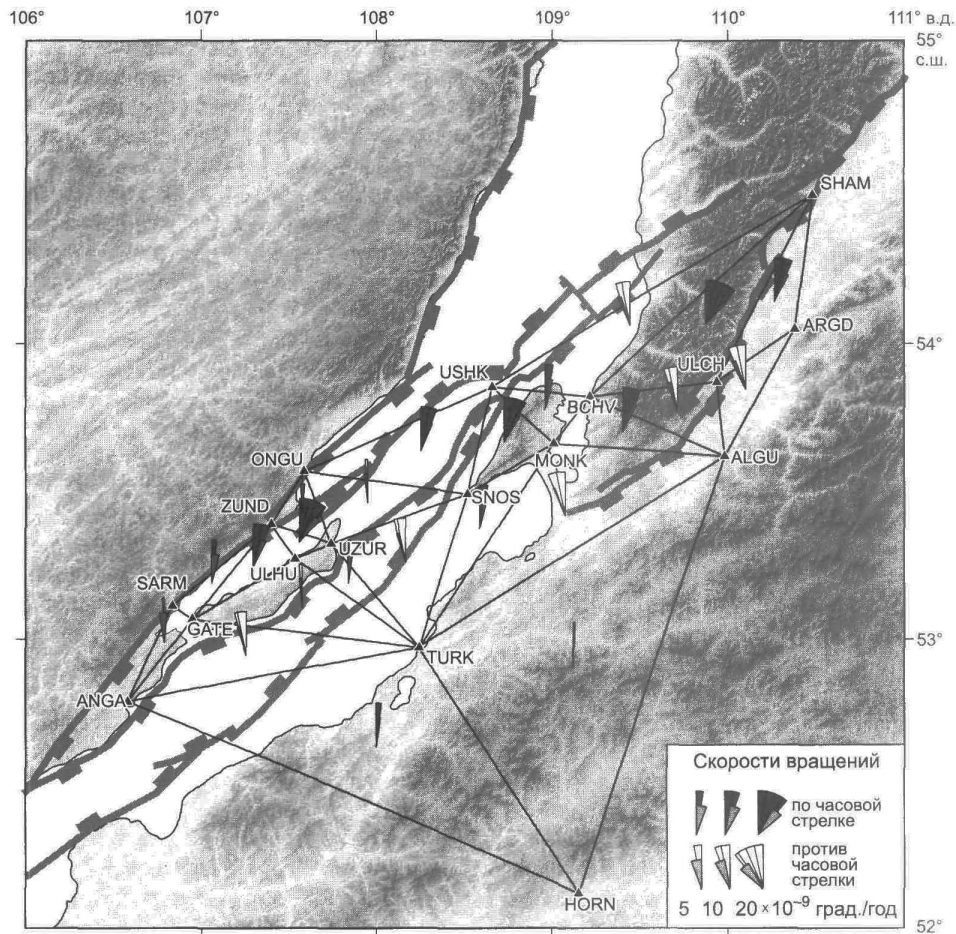
Оси деформаций удлинения показаны расходящимися незалитыми стрелками, оси укорочения — залитыми сходящимися стрелками.

мычки и Чивыркуйской впадины. Скорости деформаций удлинения достигают  $4-9 \cdot 10^{-8}$  год<sup>-1</sup>. И, наконец, для поднятия Баргузинского хребта и южной части Северо-Байкальской впадины получена нетипичная для рифта картина деформаций с преобладанием укорочения земной поверхности вкrest простирания тектонических структур и сжатием по обеим осям на уровне  $1-3 \cdot 10^{-8}$  год<sup>-1</sup>.

Расчеты направлений и скоростей относительных деформаций вращения в треугольниках геодезической сети позволяют выделить две области, отличающиеся по этим параметрам (рис. 5, табл. 3). К Маломорской впадине и южному окончанию Северо-Байкальской впадины, поднятию Баргузинского хребта и центральной части Баргузинской впадины, где главную роль играют структуры С-СВ простирания, тяготеет область с преобладанием правостороннего (по часовой стрелке) вращения земной поверхности со средней скоростью  $21.5 \cdot 10^{-9}$  год<sup>-1</sup>. Область с левосторонним (против часовой стрелки) вращением земной поверхности тяготеет к полосе структур СВ простирания в северной части Южно-Байкальской впадины и южной части Баргузинской впадины (см. рис. 3). Средние скорости вращения здесь лишь немногим ниже и составляют  $16.3 \cdot 10^{-9}$  год<sup>-1</sup> (см. табл. 2).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зоны сочленения сегментов рифтов постоянно привлекают внимание исследователей рифтовых систем Земли. Описаны различные механизмы передачи деформаций между сегментами, а также струк-



**Рис. 5.** Поле скоростей вращений земной поверхности центральной части Байкальской рифтовой системы в горизонтальной плоскости.

туры, посредством которых эти механизмы действуют [Morley et al., 1990; Peacock, Sanderson, 1991; Peacock, 2002; Long, Imber, 2011]. Трансферные зоны, зоны перекрытия взаимодействующих разломов, играют большую роль в развитии впадин. Они возникают при прорастании и объединении первоначально изолированных сегментов рифта. Как отмечали авторы работы [Delvaux et al., 1999], типичной трансферной зоной в центральной части Байкальской впадины является Ольхонско-Святоноская переемычка. На восточном борту Байкальской впадины можно выделить еще одну трансферную зону северо-восточного простирания, которая служит соединяющим звеном между Южно-Байкальской и Баргузинской впадинами (см. рис. 1). Она включает ряд разломов сбросового морфолого-генетического типа, ограничивающих Усть-Баргузинскую и южную часть Баргузинской впадин, а также разломов, осложняющих строение этих впадин. По взаимному расположению составляющих элементов — это также очень типичная для континентальных рифтов структура. Результаты моделирования подобной ситуации приведены, в частности, в работе [Аану, Коehn, 2011]. По классификации из работы [Morley et al., 1990], Ольхонско-Святоноская и Усть-Баргузинская зоны относятся к типу перекрывающихся синтетических трансферных зон.

Как показали геодезические измерения, векторы современных движений тектонических блоков центральной части Байкальского рифта и Баргузинской впадины имеют выдержанную ориентировку в юго-восточном направлении относительно Сибирского блока (см. рис. 3), что подтверждают выводы наших предыдущих исследований, сделанных на основе анализа голоценовых движений по активным разломам и данных измерений методом спутниковой геодезии [San'kov et al., 2000; Саньков и др.,



2009б]. Фактически, движение блоков направлено перпендикулярно простиранию трансферных зон и под острым углом к простиранию Северо-Байкальской и Баргузинской ветвей рифтовой системы. Такое направление движения блоков существует, по крайней мере, на протяжении этапа активного рифтогенеза (последние 3—5 млн лет). В частности, это показывает физическое моделирование процесса формирования рифтовых структур на границе мощной и прочной литосферы Сибирского кратона и более тонкой литосферы складчатой области с применением центрифуги, проведенное авторами работы [Corty et al., 2011]. Согласно этим результатам, юго-восточное направление смещения Забайкальского блока, принадлежащего к Амурской плите, относительно Сибирского блока Североевразийской плиты по азимуту  $140^\circ$  наилучшим образом отвечает существующему структурному рисунку центральной части рифтовой системы. Этими авторами особо подчеркивается, что в целом по этому сегменту структуры осуществляется правостороннее сдвиго-раздвиговое смещение.

Обращает на себя внимание тот факт, что средние скорости движений пунктов в пределах Байкальской впадины существенно ниже, чем в Баргузинской. Они составили  $3.0$  и  $6.1$   $\text{мм} \cdot \text{год}^{-1}$  соответственно. Возможно, часть этой разницы можно отнести за счет элементов вращения, поскольку Баргузинская впадина расположена дальше от пунктов системы отсчета (IRKT, BAYA, LNSK).

Поле скоростей относительных горизонтальных деформаций рассчитывается независимо от системы отсчета. Оси удлинения, которые преобладают в пределах района исследований, в среднем имеют СЗ-ЮВ направление (см. рис. 4). Это не противоречит опубликованной нами ранее региональной схеме деформаций земной поверхности Монголо-Байкальского региона [Лухнев и др., 2010], частично перекрывающейся с районом настоящих исследований, где показаны главным образом деформации удлинения, поперечного относительно простирания основных структур Южно-Байкальской впадины. При детализации оказалось, что на отдельных участках, вдоль оси укорочения действуют деформации, соизмеримые по величине с деформациями удлинения, что отвечает сдвиговому режиму деформаций. Описанная система деформаций в горизонтальной плоскости отвечает условиям раздвига по разломам СВ простирания и правостороннего сдвиго-раздвига по разломам С-СВ простирания. По данным о механизмах очагов землетрясений (см. рис. 2, б), подтверждающихся результатами расчетов сейсмотектонических деформаций, в районе преобладают условия растяжения [Солоненко и др., 1993; Petit et al., 1996; San'kov et al., 1997; Мельникова, Радзиминович, 2007; и др.]. Его направление совпадает со средним направлением удлинения, установленным нами геодезическими методами. Важно отметить, что в этом проявляется отличие Ольхонско-Святоносской и Усть-Баргузинской трансферных зон от большой группы типичных трансферных зон Восточно-Африканской рифтовой системы, для которых характерно растяжение, направленное поперек главных рифтовых структур [Peacock, 2002; Аануи, Koehn, 2011; Long, Imber, 2011] и косо — по отношению к трансферным зонам. При этом по трансферным разломам проявляются сдвиговые смещения. Широкое развитие сдвиговых парагенезов трещин, механизмов очагов землетрясений сдвигового типа в пределах зон аккомодации рифтов Танганьики и Малави отмечается в работах Д. Дельво [Delvaux, 2007; Delvaux, Barth, 2010].

В ряде публикаций по результатам геолого-структурных исследований Байкальской рифтовой системы [Шерман, Днепровский, 1989; San'kov et al., 1997; Черемных, 2006; Лунина, Гладков, 2007; и др.] подчеркивается роль сдвиговых полей тектонических напряжений в формировании восточного борта Байкальской впадины и Баргузинской впадины. Поперечные системы сдвиговых разломов выделялись ранее К.Г. Леви [Леви, 1980] в пределах о. Ольхон и п-ова Святой Нос. Однако до настоящего времени в пределах трансферных зон нет наблюдений сдвиговых смещений по разломам элементов молодого рельефа, сопоставимых или превышающих по амплитуде вертикальную составляющую движений. Возможно, структурно-геологическими методами фиксируются поля напряжений ранних этапов развития рифтовых структур, морфологические следы которых затухиваны в результате последующих поднятий и активизации эрозионных процессов.

Наличие в поле деформаций на отдельных участках (северная часть Ольхонско-Святоносской перемычки, Маломорская впадина) удлинений земной поверхности СВ-ЮЗ простирания, не типичных в целом для Байкальской впадины, находит аналогии в решениях стресс-тензоров позднекайнозойского этапа деформаций. В работе [San'kov et al., 1997] такие решения показаны для о. Большой Ушканий, м. Верхнее Изголовье п-ова Святой Нос, западного борта Чивыркуйской впадины и Приольхонья. Для Приольхонья подобные реконструкции приводятся также в работе [Семинский, 2003], а для юга Баргузинской впадины — в работе [Черемных, 2006]. Чаще всего эти решения получены в зонах поперечных разломов, которые развиваются, как сбросы, без существенной сдвиговой компоненты. Они могут интерпретироваться как вторичные структуры, формирующиеся в условиях поднятия и разрушения блоков Ольхонско-Святоносской перемычки. Несколько иной вариант интерпретации приведен в работе [Levi et al., 1997], где появление полей напряжений такого типа связывалось с окончаниями листрических сбросов, некоторые из которых в плане имеют изогнутую серповидную форму.

Поле современных деформаций осложнено также наличием участков с нерифтовым типом деформаций на юге Северо-Байкальской впадины и в пределах Баргузинского поднятия, характеризующихся средними и низкими значениями скоростей относительных деформаций сжатия, направленного поперек рифтовых структур. Последнее логично связывать с неравномерным развитием зоны сочленения впадин в результате взаимодействия контролирующих их разломов, а также с отсутствием активного растяжения в пределах поднятий, таких как поднятие Баргузинского хребта.

Согласно данным наших исследований, в южной части Байкальской впадины [Саньков и др., 2009б] наблюдается тенденция к прямой зависимости между скоростью современных горизонтальных деформаций и сейсмичностью. Эта зависимость отражает самые общие черты формирования зоны растяжения и хорошо выражена при рассмотрении распределения обоих параметров вкрест ее простирания. Во внутренней части рифта картина распределения деформаций по величине и направлению достаточно сложная. Так, максимум горизонтального удлинения земной поверхности в районе Усть-Баргузинской впадины хорошо коррелирует с активизацией сейсмического процесса в ней в течение периода измерений. Вместе с тем высоким скоростям относительных деформаций в южной части Баргузинской впадины не соответствует низкий уровень современной сейсмичности этого района. Постоянно высокая сейсмическая активность северной части Южно-Байкальской впадины ассоциирует со средними для региона значениями скорости удлинения (см. рис. 4). На уровне тенденции можно отметить уменьшение значений удлинения в Северо-Байкальской впадине по отношению к Южно-Байкальской и Баргузинской (см. рис. 4).

С.И. Шерманом с соавторами [Шерман и др., 2004] на базе анализа уровня стабильности во времени поля эпицентров землетрясений Байкальской рифтовой системы выделена современная деструктивная зона литосферы как единая сейсмоактивная тектоническая структура, протягивающаяся на исследуемой территории вдоль Южно-Байкальской впадины и продолжающаяся в СВ направлении вдоль Баргузинской впадины в направлении Муйской впадины. Предполагается, что именно в этой зоне сосредоточены максимальные современные деформации. Для Южно-Байкальской впадины это подтверждено нами ранее [Саньков и др., 2009а]. Приведенные в настоящей работе данные о скоростях горизонтальных деформаций (см. рис. 2) также не противоречат этой идее. Похоже, что современный этап жизни Байкальского рифта больше связан с объединением Южно-Байкальской и Баргузинской впадин и концентрацией деформаций в их пределах, нежели с объединением Южно-Байкальской и Северо-Байкальской впадин.

## ВЫВОДЫ

В результате проведения многолетних измерений на Байкальском геодинамическом полигоне с использованием метода GPS геодезии получены новые данные о современных деформациях в области сочленения Южно-Байкальской, Северо-Байкальской и Баргузинской впадин, которая представляет собой сложную структуру с двумя трансферными зонами — Ольхонско-Святоносской и Усть-Баргузинской. Поле скоростей горизонтальных движений в этой части рифтовой системы в региональном плане характеризует ЮВ направление векторов относительно Сибирского блока Евразийской литосферной плиты. Средние значения скоростей увеличиваются от  $3.0 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$  в северной части Южно-Байкальской впадины до  $6.5 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$  — в Баргузинской.

Преобладающим для района является поле деформаций удлинения земной поверхности в СЗ-ЮВ направлении. Эти данные соответствуют современному полю тектонических напряжений, рассчитанному по данным о механизмах очагов землетрясений. Вместе с тем на многих участках отмечается сдвиговый тип поля деформаций. Наряду с указанными решениями в Маломорской впадине, в северной части Ольхонско-Святоносской перемычки и в Чивыркуйской впадине получены решения с СЗ-ЮВ направлением удлинения. По-видимому, это связано с формированием поперечных к общему простиранию рифта сбросов в условиях поднятия и разрушения блоков Ольхонско-Святоносской перемычки.

В рассчитанном поле скоростей вращения земной поверхности выделяются две зоны с разнонаправленным вращением. Правостороннее (по часовой стрелке) вращение характерно для структур С-СВ простирания (Маломорская впадина, южная часть Северо-Байкальской впадины, поднятие Баргузинского хребта). Левостороннее (против часовой стрелки) вращение получено для структур СВ простирания (северная часть Южно-Байкальской впадины, южная часть Баргузинской впадины).

В целом полученные данные показывают сложную картину современных горизонтальных смещений и деформаций в пределах области сочленения рифтовых структур СВ и С-СВ простирания, подчеркивая потенциальную возможность реализации в их пределах соответственно левосторонних и правосторонних сдвиговых движений по разломам.

Области повышенных деформаций тяготеют к структурам с высоким уровнем сейсмической активности в Южно-Байкальской и, отчасти, в Баргузинской впадинах, что подтверждает существование

современной зоны деструкции земной коры в Байкальской рифтовой системе [Шерман и др., 2004], которая представляется наиболее вероятным источником сильных землетрясений будущего.

Работы выполняются при частичной поддержке фонда РФФИ (грант 12-05-98035-р\_сибирь\_а), междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 11 и проекта программы ОНЗ РАН № 7.7.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гарвардский университет <http://www.globalcmt.org/>  
Геологическая Служба США <http://neic.usgs.gov/>
- Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. Обнинск, ГС РАН, 2003, 278 с.  
Землетрясения Северной Евразии в 1998 году. Обнинск, ГС РАН, 2004, 491 с.  
Землетрясения Северной Евразии в 1999 году. Обнинск, ФОП, 2005, 368 с.  
Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. Обнинск, ГС РАН, 2006, 376 с.  
Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. Обнинск, ГС РАН, 2007, 404 с.  
Землетрясения Северной Евразии в 2002 году. Обнинск, ГС РАН, 2008, 428 с.
- Леви К.Г. Относительное перемещение плит в Байкальской рифтовой зоне // Геология и геофизика, 1980(5), с. 9—15.
- Логачев Н.А. Об историческом ядре Байкальской рифтовой зоны // ДАН, 2001, т. 376, № 4, с. 510—513.
- Лунина О.В., Gladkov A.C. Разломно-блоковое строение и поля напряжений земной коры Баргузинского рифта в позднем кайнозое (Байкальский регион) // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (7), с. 775—789.
- 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—1018.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 252 с.
- Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991—1996 гг. // Геология и геофизика, 1998, т. 39, (11), с. 1598—1607.
- Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Параметры сеймотектонических деформаций земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным // ДАН, 2007, т. 416, № 4, с. 1—3.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Добрынина А.А., Ашурков С.В. Современные тектонические деформации и сейсмичность Южно-Байкальской впадины // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия. Материалы Всероссийского совещания (г. Иркутск, 18—21 августа 2009 г.). В 2-х т. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2009а, т. 2, с. 59—61.
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж. Растяжение в Байкальском рифте: современная кинематика пассивного рифтогенеза // ДАН, 2009б, т. 424 (5), с. 664—668.
- Сейсмическое районирование Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1977, 302 с.
- Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 243 с.
- Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Кучай О.А., Суханова С.С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М., ИФЗ РАН, 1993, вып. 1, с. 111—122.
- Черемных А.В. Разломно-блоковое строение земной коры и напряженное состояние в зонах региональных разломов восточного побережья озера Байкал // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (2), с. 250—258.
- Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск, Наука, 1989, 158 с.
- Шерман С.И., Демьянович В.М., Лысак С.В. Сейсмический процесс и современная многоуровневая деструкция литосферы в Байкальской рифтовой зоне // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (12), с. 1458—1470.
- Aanyu K., Koehn D. Influence of pre-existing fabrics on fault kinematics and rift geometry of interacting segments: analogue models based on the Albertine Rift (Uganda), Western Branch—East African Rift System // J. African Earth Sci., 2011, v. 59, p. 168—184. doi:10.1016/j.jafrearsci.2010.10.003

**Altamimi Z., Collilieux X., Métivier L.** ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame // *J. Geodesy*, 2011, v. 85, p. 457—473. doi: 10.1007/s00190-011-0444-4

**Corti G., Calignano E., Petit C., Sani F.** Controls of lithospheric structure and plate kinematics on rift architecture and evolution: an experimental modeling of the Baikal Rift // *Tectonics*, 2011, v. 30, TC3011, doi:10.1029/2011TC002871.

**Delvaux D.** Quaternary stress field and deformation at a rift triple junction / accommodation zone: synthesis from the Tanganyika—Rukwa—Nyasa Rift (SW Tanzania) // *Geophys. Res. Abstracts*, 2007, v. 9, p. 10195.

**Delvaux D., Barth A.** African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data. Implications for rifting dynamics // *Tectonophysics*, 2010, v. 482, p. 105—128. doi:10.1019/j.tecto.2009.05.009.

**Delvaux D., Fronhoffs A., Hus R., Poort J.** Normal fault splays, relay ramps and transfer zones in the central part of the Baikal Rift basin: insight from digital topography and bathymetry // *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf Aquitaine*, 1999, v. 22 (2), p. 341—358.

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

**Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P., Moore T.C., Scholz C.A., Klitgord K.D.** Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data // *Geology*, 1992, v. 20, p. 589—592.

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

**Levi K.G., Miroshnichenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D.** Active faults of the Baikal depression // *Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod.*, 1997, 21(2), p. 399—434.

**Long J.J., Imber J.** Geological controls on fault relay zone scaling // *J. Struct. Geol.*, 2011, v. 33, p. 1790—1800. doi:10.1016/j.jsg.2011.09.011

**Morley C.K., Nelson R.A., Patton T.L., Munn S.G.** Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon in rifts // *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1990, v. 74, № 8, p. 1234—1253.

**Peacock D.C.P.** Propagation, interaction and linkage in normal fault systems // *Earth-Sci. Rev.*, 2002, v. 58 (1—2), p. 121—142.

**Peacock D.C.P., Sanderson D.J.** Displacements, segment linkage and relay ramps in normal fault zones // *J. Struct. Geol.*, 1991, v. 13 (6), p. 721—733.

**Petit C., Déverchère J.** Structure and evolution of the Baikal rift: a synthesis // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2006, v. 7. Q11016, doi:10.1029/2006GC001265.

**Petit C., Deverchère J., Houdry F., Sankov V.A., Melnikova V.I., Delvaux D.** Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implication // *Tectonics*, 1996, v. 15, № 6, p. 1171—1191.

**San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Lukhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D.** Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone // *Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod.*, 1997, 21(2), p. 435—455.

**San'kov V., Déverchère J., Gaudemer Y., Houdry F., Filippov A.** Geometry and rate of faulting in the North Baikal Rift, Siberia // *Tectonics*, 2000, v. 19, № 4, p. 707—722.

*Рекомендована к печати 26 декабря 2012 г.  
В.С. Селезневым*

*Поступила в редакцию  
7 сентября 2012 г.*