

УДК 528.2/3

ПРЕЦИЗИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ АЗИИ

© 2015 г. О.Н. Галаганов, Т.В. Гусева, И.С. Крупенникова, В.П. Передерин

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрены результаты измерений, выполненных на северо-востоке Азии с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС измерений). Установлено, что в 2009–2012 гг. в системе отсчета ITRF¹ горизонтальное смещение пунктов происходило на юго-восток по азимуту 134° со средней скоростью 22.3 мм/год, что сопоставимо с данными измерений 1998–2002 гг. Выполненные измерения дают возможность оценить скорость накопления деформаций в исследуемом регионе. По изменениям в разные временные интервалы независимо определяемых длин линий между пунктами определены скорости линейных деформаций. Значения скоростей линейных деформаций, составляющие от $-1.9 \cdot 10^{-8}$ в год (укорочение) до $2.4 \cdot 10^{-8}$ в год (удлинение), позволяют получить картину современного деформирования региона. Установлено, что на большей части исследуемой территории преобладает укорочение; наибольшие значения и укорочений, и удлинений отмечены в пределах пояса сейсмической активности.

На основании расчетов скоростей горизонтальных движений относительно разных начал отсчета с использованием современных моделей можно утверждать, что сейсмический пояс Черского, входящий в состав крупной орогенной системы северо-востока Азии, относится к Евразийской литосферной плите.

Ключевые слова: ГНСС измерения, северо-восток Азии, пояс Черского, скорости, движения, деформации, Евразия, литосферная плита.

Введение

Северо-восток Азии является крупной орогенной системой, внутри которой находится дугообразная коллизионная структура – пояс Черского. В пределах пояса выделяются офиолитовые аллохтоны, разнообразные метаморфические комплексы с длительной историей формирования [Оксман, 2000]. Считается, что формирование горных хребтов пояса связано с взаимодействием Евразийской и Северо-Американской литосферных плит. Сейсмическая зона пояса Черского лежит на продолжении хребта Гаккеля в Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана, охватывает шельф моря Лаптевых, хребет Черского, прилегающие районы Магаданской области, полуостров Камчатка и соединяется с сейсмическими поясами обрамления Тихого океана [Имаев, Имаева, Козьмин, 2000, Имаев и др., 2009].

Неоднородное по структуре эпицентральному полю сейсмической зоны пояса Черского (рис. 1) имеет вид полосы шириной 400–600 км. В 2013 г. здесь была отмечена очередная активизация сейсмичности – 14.02.2013 г. произошло землетрясение с $M=6.6$ (67.58° с.ш., 142.59° в.д.), сопровождавшееся роем форшоков и афтершоков и ставшее самым сильным за весь период инструментальных наблюдений.

Уточнение положения границ между литосферными плитами – одна из проблем, решаемых современной геодинамикой. Хотя с момента появления теории тектоники плит прошло уже более полувека, эта проблема остаётся предметом дискуссии [Нувейшая..., 2000].

¹ *International Terrestrial Reference Frame* – Международная земная система отсчета.

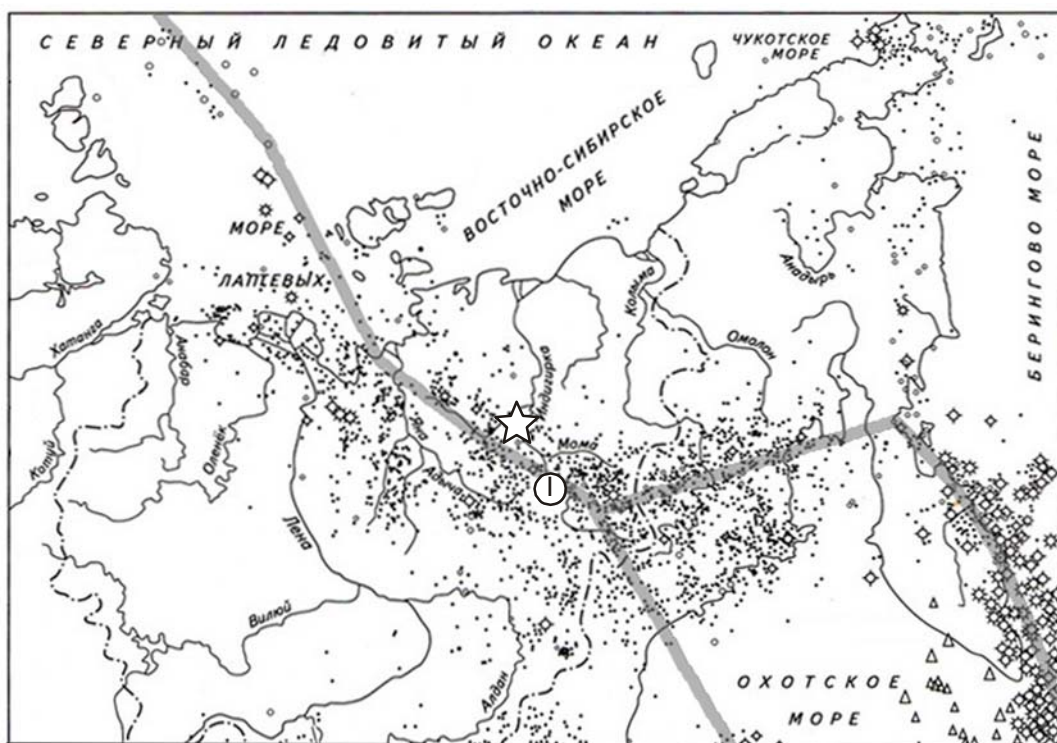


Рис. 1. Схема расположения эпицентров землетрясений, произошедших на северо-востоке Азии, и предполагаемой по геолого-сейсмологическим данным границы плит

Кружки – эпицентры землетрясений с $M=4.0-6.8$; треугольники – с $M=6.0-7.0$; звездочка – эпицентр землетрясения 14.02.2013 г. с $M=6.6$; серая полоса – предполагаемая граница плит; I в кружке – сейсмический пояс Черского по [Тектоника..., 2001]

Граница между Евразийской и Северо-Американской плитами на северо-востоке Азии (серая изломанная полоса на рис. 1) проведена по геоструктурным элементам сеймотектонической зоны хребта Черского. Скорости движения плит оценивались на основе анализа полосовых магнитных аномалий и геологических данных, а направление движения определялось по ориентации трансформных разломов и результатам сейсмологических наблюдений.

Постановка задачи

Развитие глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) позволяет с помощью непосредственных измерений получать точные координаты закрепленных на местности пунктов. Повторные ГНСС измерения и анализ результатов их обработки дают возможность определять количественные характеристики современных движений и деформаций земной коры, а также проверять стабильность зоны коллизии литосферных плит, выделяемой по геолого-сейсмологическим данным, сравнивать геодезические параметры движений, полученные в разные временные интервалы, рассматривать соответствие скорости горизонтальных движений и их направленности разным плитам.

По инициативе академика А.О. Глико и профессора А.Ф. Грачева в Программу ОНЗ-6 “Динамика континентальной литосферы: геолого-геофизические модели” был включен проект “Граница между Евразийской и Северо-Американской плитами литосферы и проблемы глобальной геодинамики”. Основные исполнители этого проекта – сотрудники Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Большой вклад в геолого-

тектоническое обоснование проекта и проведение полевых работ первого этапа внесли специалисты Северо-восточного комплексного научно-исследовательского института Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН) и Геофизического центра Потсдама (GeoForschungs Zenter, Потсдам, Германия).

Инструментальные наблюдения

Инструментальные ГНСС измерения на сейсмическом поясе Черского в рамках названной программы выполнялись в июле–августе 2009, 2010 и 2012 гг. (эпохи 2009.53, 2010.56, 2012.54). Наблюдательная сеть включала пункты, заложенные на поясе Черского в 2003 г. по обе стороны от Момского рифта, и ближайшие пункты сетей постоянной регистрации IGS и NEDA (рис. 2); расстояния между пунктами – от 100 до 2800 км. Предполагалось, что ГНСС измерения в столь сложном тектоническом регионе частично будут финансироваться немецкой стороной, но из-за наступившего кризиса этого не произошло.

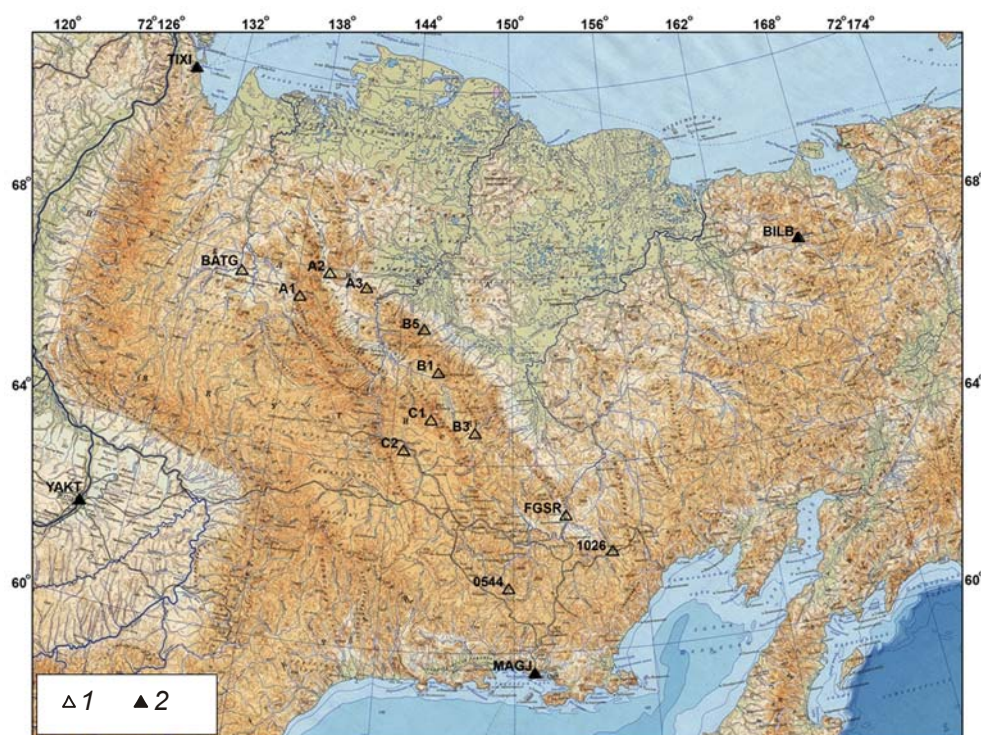


Рис. 2. Расположение пунктов ГНСС измерений в эпохи 2009.53, 2010.56, 2012.54
1 – пункты сетей IGS и NEDA; 2 – пункты повторных наблюдений

При наблюдениях использовался метод дифференциального позиционирования в статическом режиме. Этот метод определения координат спутникового приемника на закрепленном пункте предусматривает их уточнение по данным, получаемым с других приемников, установленных на станциях с известными координатами, которые принято называть базовыми, опорными или референц-станциями. Продолжительность измерений в первую эпоху составляла 9 суток, во вторую – 15, в третью – 12; на пунктах измерения велись в течение не менее четырех суток при 30-секундном интервале между замерами спутниковых сигналов. Наблюдения на всех пунктах используемой сети были выполнены только во вторую эпоху; в две другие организовать их удалось лишь частично, что связано с труднодоступностью пунктов и недостатком финансирования.

При измерениях использовались двухчастотные двухсистемные приемники GPS/ГЛОНАСС фирмы Javad Маhog в комплекте с антеннами CR-3 и RingAnt.

Обработка измерений

Для обработки получаемых “сырых” данных применялась программа Bernese5.0; в качестве базовых использовались опорные станции международной геодинимической сети со стабильной без пропусков регистрацией спутниковых сигналов – NRIL (Норильск), YSSK (Южно-Сахалинск), IRKJ (Иркутск), TIXI (Тикси). В обработку был включен также пункт YAKT (Якутск) сети IGS, который из-за пропусков в измерениях и нестабильности изменения координат во времени рассматривался только как “определяемый” (расположение станций см. на рис. 1). Координаты опорных станций и скорости их смещения в системе ITRF 2008 брались из открытых источников на начальную эпоху 01.01.2005 г. и пересчитывались с учетом среднегодовых скоростей на средний день обрабатываемой эпохи измерений. Координаты “определяемых” пунктов были взяты из RINEX-файлов, полученных при полевых измерениях.

Так как измерения на каждом пункте продолжались несколько суток, то сначала определялись среднесуточные значения координат, а затем – их средневзвешенные значения за несколько суток. В результате совместного уравнивания среднесуточных значений были определены окончательные значения координат и ошибки в ITRF 2008 для трех эпох наблюдений. Осредненные за эпоху средние квадратические ошибки (погрешности) определения геоцентрических (m_x , m_y , m_z) и геодезических (m_u – высота, m_n – широта, m_e – долгота) координат приведены в табл. 1. Погрешность плановых координат не превышает 0.3 мм, высотных в 2 раза хуже. Полученные результаты свидетельствуют о высоком качестве выполненных наблюдений и правильности выбранной методики постобработки “сырых” данных.

Таблица 1. Среднеквадратические ошибки определения координат

Эпоха наблюдений	Ошибки, мм					
	геоцентрические координаты			геодезические координаты		
	m_x	m_y	m_z	m_u	m_n	m_e
2009.53	0.3	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2
2010.56	0.3	0.3	0.7	0.7	0.3	0.2
2012.54	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1	0.1

Для более полной характеристики горизонтальных движений в столь сложном регионе были привлечены данные нескольких циклов повторных ГНСС измерений, выполненных в 1998–2002 гг. на пунктах в юго-восточной части пояса Черского. Результаты обработки этих данных в ITRF 2000 по программе GAMIT приведены в табл. 2 [Стеблов, 2004б]. Кроме того, были привлечены данные о скоростях горизонтальных движений пунктов на территории Аляски (www.unavco.org).

Подборка данных о скоростях горизонтальных движений пунктов наблюдений отражена в векторном виде на карте, приводимой на рис. 3. Можно видеть, что пункты с постоянной и с эпизодической повторной регистрацией спутниковых сигналов, расположенные на территории северо-восточной части России, смещаются в юго-восточном направлении, а пункты на Аляске – в юго-западном и южном.

Таблица 2. Скорости горизонтальных движений пунктов используемой наблюдательной сети согласно ITRF 2000 за 2010–2012 гг. (V_n – север-юг, V_e – восток-запад, V_s – модуль вектора, Аз – азимут вектора)

Пункт	V_n , мм/год	V_e , мм/год	V_s , мм/год	Аз, град
B1	–14.0815	17.2346	22.2558	129
B3	–17.6651	14.2276	22.6822	141
B5	–15.0040	16.2644	22.1281	137
C1	–16.0708	16.4894	23.0255	134
C2	–14.3492	15.3599	21.0197	133
BATG	–12.5457	17.8166	21.7905	125
BILB	–21.0399	8.7749	22.7964	157
IRKJ	–7.3583	27.3520	28.3245	105
MAGJ	–16.3215	14.3951	21.7626	139
NRIL	–1.7831	23.1670	23.2355	94
TIXI	–10.7761	17.5391	20.5851	122
YAKT	–12.1576	20.5365	23.8653	121
YSSK	–12.7000	15.8693	20.3255	129

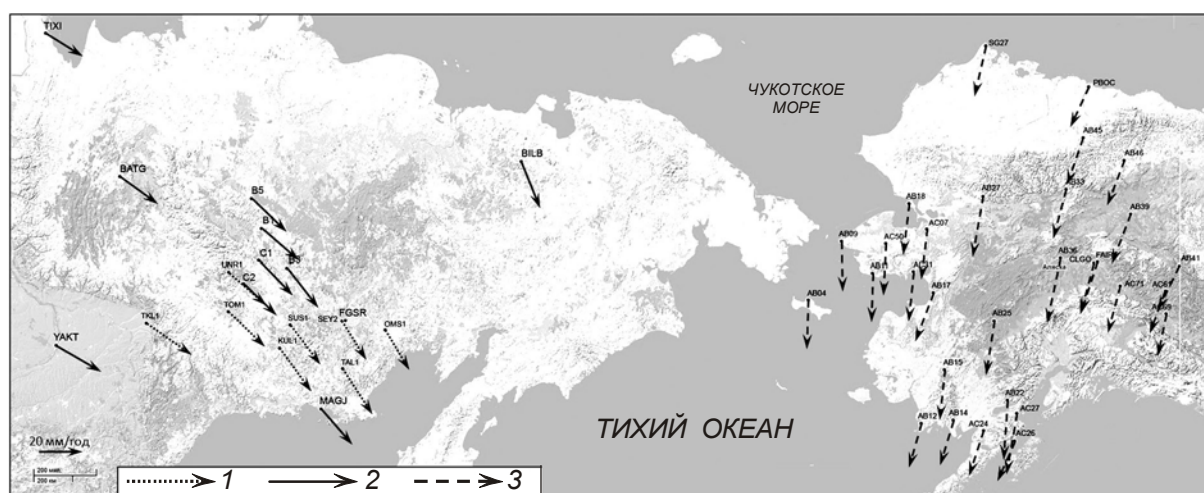


Рис. 3. Векторы скоростей горизонтальных движений, установленные по данным GPS измерений на северо-востоке России [Стеблов, 2004б] и на Аляске (www.unavco.org): 1, 2 – измерения, выполненные ИФЗ РАН в 1998–2002 гг. (1) и 2010–2012 гг. (2); 3 – по данным интернет

Горизонтальные движения и деформации

Сравнение координат за разные временные интервалы между эпохами наблюдений позволило получить значения скоростей горизонтальных смещений пунктов на поясе Черского. Согласно ITRF 2008, в 2009–2012 гг. смещение пунктов происходило в юго-восточном направлении по азимуту 134° со средней скоростью 22.3 мм/год, в 2010–2012 гг. – по азимуту 132° со скоростью 22.1 мм/год и в 2009–2010 гг. – по азимуту 134° со скоростью 22.8 мм/год (табл. 3).

Таблица 3. Сводка среднегодовых скоростей по данным измерений 1998–2002 гг.

Пункт	Период наблюдений		V_n , мм/год	V_e , мм/год	V_s , мм/год	Аз, град
KUL1	1998.87	2002.66	–20.0	14.5	24.70	144
OMS1	2000.59	2002.57	–18.4	11.1	21.49	149
SEY2	2000.59	2002.59	–17.9	11.2	21.12	148
SUS1	1998.87	2002.64	–18.1	13.4	22.52	143
TAL1	2000.59	2002.57	–20.9	13.7	24.99	147
TKL1	1999.75	2002.64	–14.4	20.4	24.97	125
TOM1	1999.75	2002.64	–16.2	16.7	23.27	134
UNR1	1998.87	2002.61	–14.8	16.8	22.39	131

Для выявления характера горизонтальных движений внутри пояса Черского были вычислены скорости смещения относительно пункта BATG, расположенного на северо-западе исследуемого района. Установлено, что локальные относительные перемещения происходят со средней скоростью 3.5 мм/год по направлению, ортогональному основным разломам пояса. Карта векторов скоростей горизонтальных движений пунктов относительно пункта BATG представлена на рис. 4.

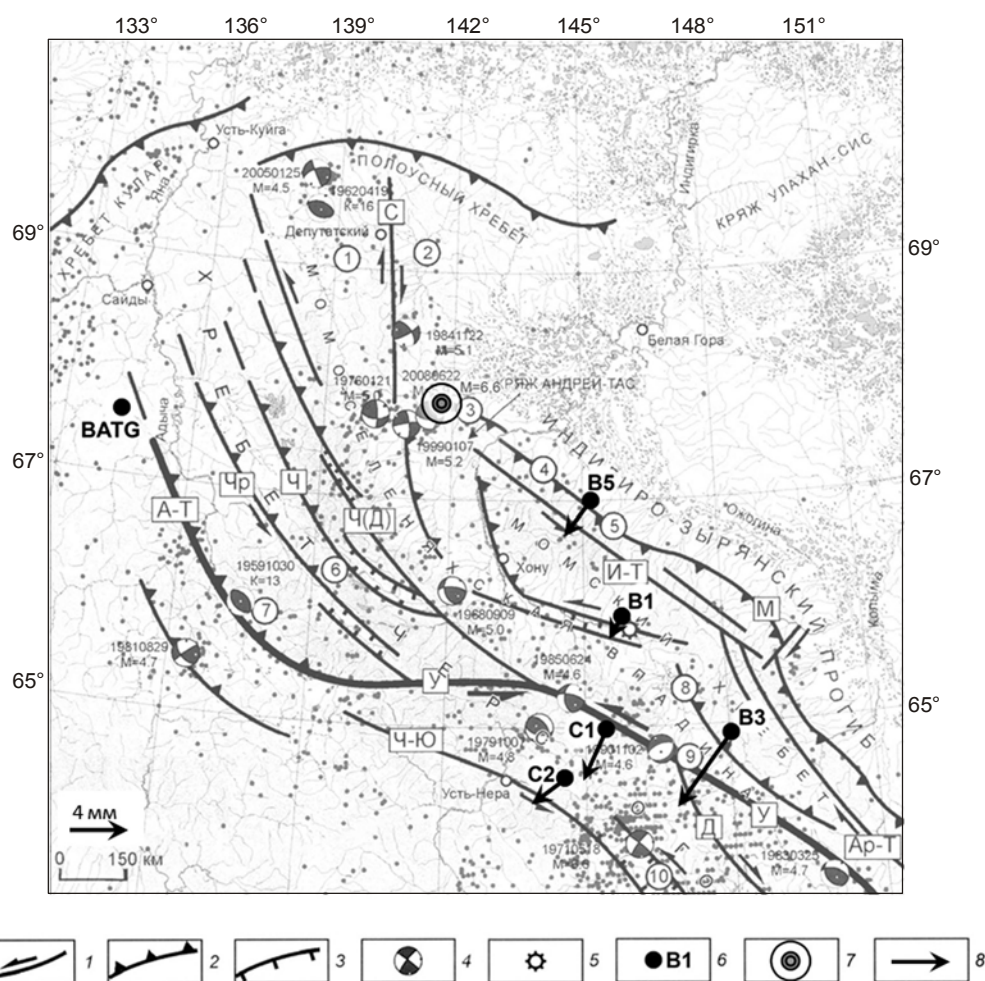


Рис. 4. Векторы скоростей горизонтальных смещений относительно пункта BATG (сейсмостектоника зоны хребта Черского приводится по [Имаев и др., 2009; Имаева, Козьмин, Имаев, 2009])

Материалы выполненных измерений позволяют оценить скорость накопления деформаций в исследуемом регионе. По изменениям за разные временные интервалы независимо определяемых длин линий между пунктами получены скорости линейных деформаций. Значения скоростей линейных деформаций от $-1.9 \cdot 10^{-8}$ в год до $2.4 \cdot 10^{-8}$ в год отнесены к середине расстояния между пунктами. Эти данные позволяют получить картину современного деформирования региона. Приводимая на рис. 5 карта скоростей линейных деформаций наглядно показывает, что в регионе при наличии локальных удлинений преобладают укорочения. Наибольшие значения удлинений и укорочений присущи поясам сейсмической активности.

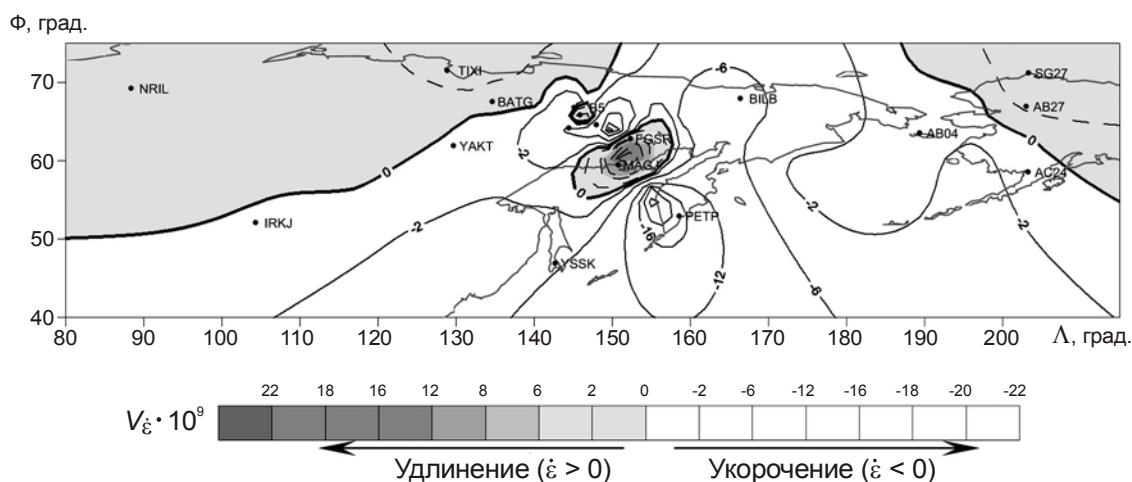
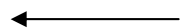


Рис. 5. Карта скоростей линейных деформаций в регионе контакта Азии и Аляски, построенная по данным GPS измерений в 2010–2012 гг. Сечение изолиний – $2 \cdot 10^{-9}$

Анализ горизонтальных смещений пунктов свидетельствует о схожести характера современных движений на поясе Черского с аналогичными на Евразийской литосферной плите и не подтверждает наличия в регионе четкой границы с Северо-Американской плитой. В основе последнего заключения лежат следующие обстоятельства.

1. По данным сравнения координат пунктов в системе ITRF установлены разные направления современных горизонтальных движений на поясе Черского и на Аляске. В первом случае смещение происходит в юго-восточном направлении, что соответствует движениям на Евразийской плите. Во втором случае – на Аляске – фиксируется смещение в юго-западном, аналогичном направлению движений на Северо-Американской плите (см. рис. 3).



К рис. 4: 1–3 – разломы разного типа: сдвиги (1), надвиги (2), сбросы (3); 4 – механизмы очагов сильных землетрясений с указанием их даты (ГГГГММДД) и магнитуды, секторы без заливки – области сжатия; 5 – вулкан Балаган-Тас; 6 – ГНСС пункты и их название; 7 – эпицентр землетрясения 14.02.2013 г. с $M=6.6$; 8 – векторы скоростей горизонтальных движений. Цифры в кружках – позднекайнозойские деформации: 1 – Верхнеселеняхская; 2 – Инач; 3 – Сисиктех, Никондя; 4 – Кыллах; 5 – Мятись, Элганя; 6 – Чаркынская; 7 – Ченкеленьинская; 8 – Нижнемомская; 9 – Улахан; 10 – Верхненерская. Сокращения в прямоугольниках – главные разломы: А-Т – Адыча-Тарынский, Чр – Чаркынский, Ч – Чемалгинский, Ч(Д) – Чибгалахский (Догдинский), У – Улахан, Д – Дарпир, Ч-Ю – Чай-Юреинский, М – Мятисский, И-Т – Илин-Тасский, Ар-Т – Арга-Тасский, С – Селеняхский. Серые кружки – эпицентры инструментально зарегистрированных землетрясений, произошедших в районе в разные годы

2. Отмечено существенное несовпадение скоростей и направлений горизонтальных движений на поясе Черского, полученных непосредственно по данным ГНСС измерений, с результатами их расчетов по модели NUVEL-1A, предполагающей вращение Северо-Американской плиты вокруг полюса Эйлера, который расположен на Евразийской плите (рис. 6).

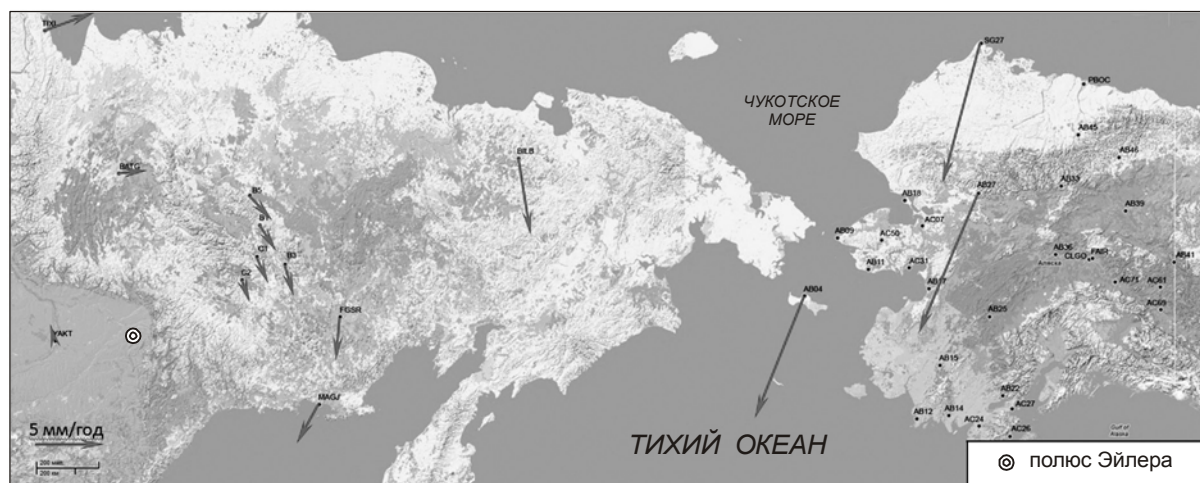


Рис. 6. Векторы скоростей горизонтальных движений, рассчитанные по модели NUVEL-1A при вращении Северо-Американской плиты относительно полюса Эйлера на Евразийской плите

3. Горизонтальные движения относительно пункта BATG свидетельствуют лишь о наличии локальных внутривидовых деформаций со скоростью до 5 мм/год (см. рис. 4).

Таким образом, выполненные исследования позволяют по-новому взглянуть на дискуссионную проблему наличия границ литосферных плит на северо-востоке Азии. По мнению авторов, для решения этой проблемы необходимо продолжение подобных исследований.

Литература

- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сейсмоструктура Якутии. 2000. 227 с.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Маккей К., Козьмин Б.М. Геодинамика отдельных сегментов литосферных плит на северо-востоке Азии // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 1. С.43–63.
- Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Имаев В.С. Сейсмоструктура северо-восточного сегмента зоны хр. Черского // Отечественная геология. 2009. № 5. С.95–100.
- Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии / Под ред. А.Ф. Грачева. М.: ОИФЗ РАН, 2000. 487 с.
- Оксман В.С. Тектоника коллизионного пояса Черского (северо-восток Азии). М.: ГЕОС, 2000. 269 с.
- Стеблов Г.М. Взаимодействие тектонических плит в Северо-Восточной Азии // Докл. РАН. 2004а. Т. 394, № 5. С.689–692.
- Стеблов Г.М. Крупномасштабная геодинамика на основе космической геодезии: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2004б. 203 с.
- Тектоника, геодинамика металлогения территории республика Саха (Якутия). М.: МАИК "Наука/Интерпериодика", 2001. 571 с.

Сведения об авторах

ГАЛАГАНОВ Олег Николаевич – кандидат физико-математических наук, заместитель директора, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-89-65. E-mail: galagan@ifz.ru

ГУСЕВА Тамара Вениаминовна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-89-65. E-mail: guseva@ifz.ru

КРУПЕННИКОВА Ирина Сергеевна – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-89-65. E-mail: irika-81@mail.ru

ПЕРЕДЕРИН Виктор Петрович – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(499) 254-89-65. E-mail: vpp@ifz.ru

GNSS MEASUREMENTS IN NORTHEAST ASIA

O.N. Galaganov, T.V. Guseva, I.S. Krupennikova, V.P. Perederin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. In this paper the results of GNSS measurements in Northeast Asia are considered. It is revealed that horizontal displacements of points in the ITRF system occurred with an average rate of 22.3 mm/year in the southeast azimuth 134° for the period 2009–2012, which is comparable with the measurements of 1998–2002. The measurements data allow us to evaluate the rate of strain accumulation in the studied region. For independently determined baselines between points there are linear deformations rates obtained using their changes over different time intervals. The rates of linear deformations of $-1.9 \cdot 10^{-8}$ per year (shortening) up to $2.4 \cdot 10^{-8}$ per year (extension) allow us to get an image of modern deformation of this region. The most part of the studied area is characterized by shortening; the most magnitudes of extension and shortening are typical for the seismic activity belt.

The velocities of horizontal movements calculated with relation to different reference frames using modern models shows that the Cherskiy belt within a large orogenic system in Northeast Asia is a part of the Eurasian lithospheric plate.

Keywords: GNSS measurements, Northeastern Asia, rates, movements, deformations, Eurasia, lithospheric plate.