

УДК 551.24:528.029.69

DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-95-108

ТЕОРИЯ ПЛИТНОЙ ТЕКТОНИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПОСТОЯННОЙ СТАНЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ NVSK

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Елена Валерьевна Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Непрерывные измерения геодезическими двухчастотными приемниками космической геодезии на постоянных станциях дают наиболее точный результат по координатам и скоростям смещения. Использование на постоянной станции (NVSK, номер 12319 в сети IGS) приемника TRIMBLE4700 с июля 2000 г. по февраль 2016 г. позволило определить координаты с точностью до долей миллиметра. В результате многолетних GPS-наблюдений определены скорости горизонтальных смещений станции ($V_N = -1,2$ мм/год и $V_E = 26,3$ мм/год). Смещения пунктов соответствуют основным положениям теории тектоники плит. В итоге, выбрана модель вращения Евразийской плиты с координатами полюса Эйлера 54.2°N , 259.3°E и скоростью вращения $0,251$ градус/млн лет. С 2016 г. станция переоснащена комплексным приемником ГЛОНАСС-GPS, что ставит новые метрологические задачи при исследованиях на станции NVSK, расположенной на сейсмостанции Ключи в 10 км от Академгородка г. Новосибирска.

Ключевые слова: космическая геодезия, ГЛОНАСС-GPS, двухчастотные приемники, модели тектоники плит, скорость горизонтальных смещений.

Введение

Геологические методы, описывающие гипотезы зарождения и дальнейшей эволюции Земли, развиваются уже несколько столетий. Отдельная геологическая наука – тектоника – строила эти гипотезы, являясь, по сути, философией геологии. Существовали представления о том, что активная фаза геологической истории уже в далеком прошлом, и нам остается только восстановить историю эволюции Земли. В результате палеонтологических исследований появлялись

различные теории катастроф. Толчком к их возникновению явилось обнаружение фактов массовой гибели динозавров и исчезновение отдельных видов животных и растений. Обнаружение окаменелых образцов морской фауны в высокогорных районах приводило к возникновению теорий о периодических вертикальных движениях земной поверхности. В конце XIX в. появились теории расширяющейся, пульсирующей Земли. Они в основном служили для объяснения наличия вертикальных движений. Горизонтальные движения в старых теоретических построениях обычно играли второстепенную соподчиненную роль.

Дальнейшее развитие геологии в XX веке привело к возникновению современной теории тектоники плит. В рамках этой теории, Земля покрыта системой тектонических плит, находящихся в состоянии постоянных горизонтальных движений. Выделение плит проводится по геологическим и геофизическим признакам. В итоге модель «тектоники плит» показывает, что большинство активных процессов, происходящих на планете, – от извержений вулканов до землетрясений и горообразовательных процессов – обычно случаются на границах тектонических плит. На рис. 1 приведена модельная конфигурация плит.

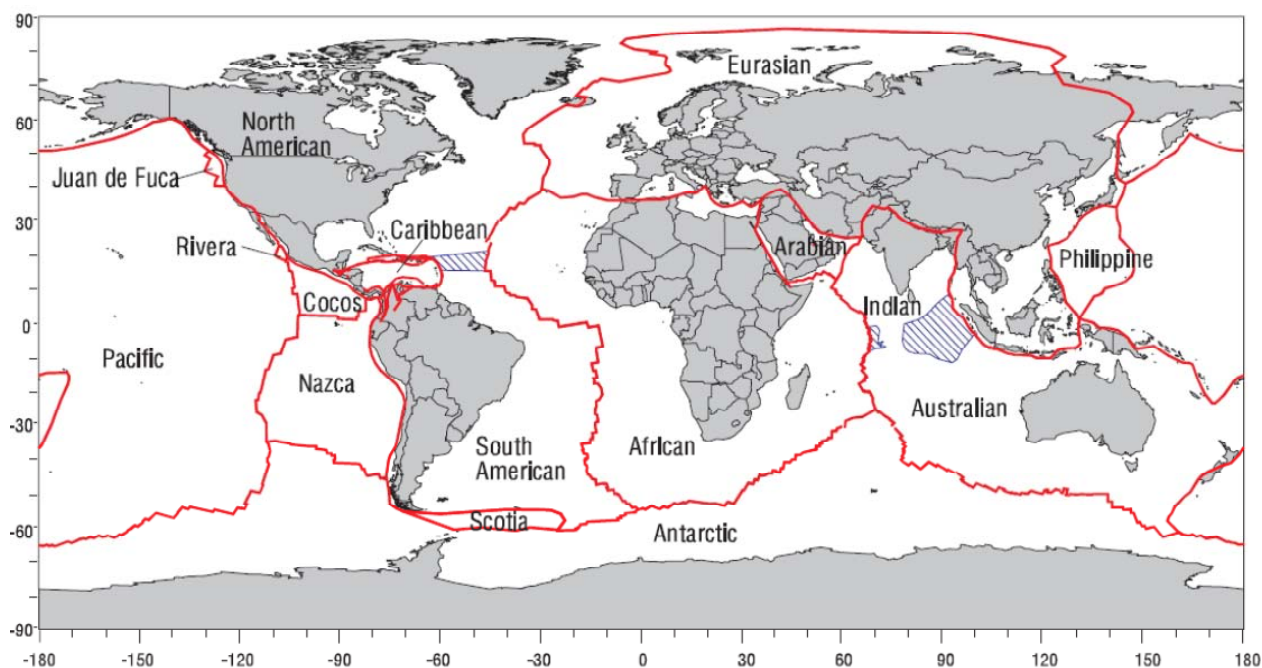


Рис. 1. Карта тектонических плит Земли [1]

Границы жестких литосферных плит бывают достаточно протяженными в пространстве и на них наблюдаются активные современные процессы – смещения и деформации (рис. 2).

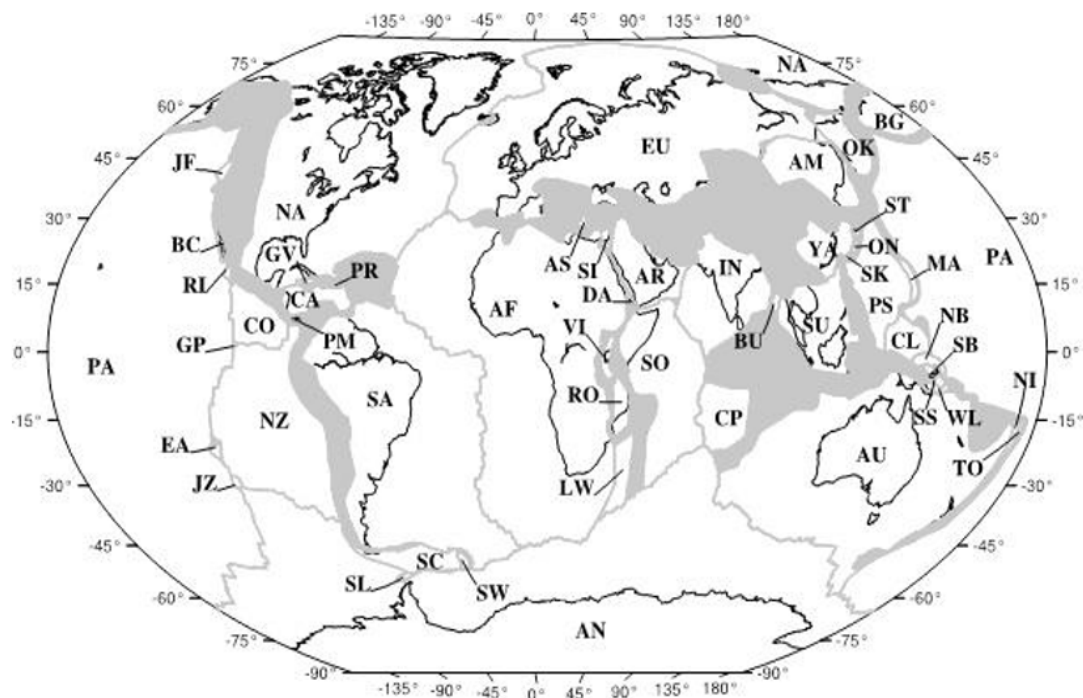


Рис. 2. Литосферные плиты и их границы [2]

Движение жестких плит

Движение плит на сфере описывается как вращение, точка выхода оси вращения на поверхность (рис. 3), известна как полюс Эйлера.

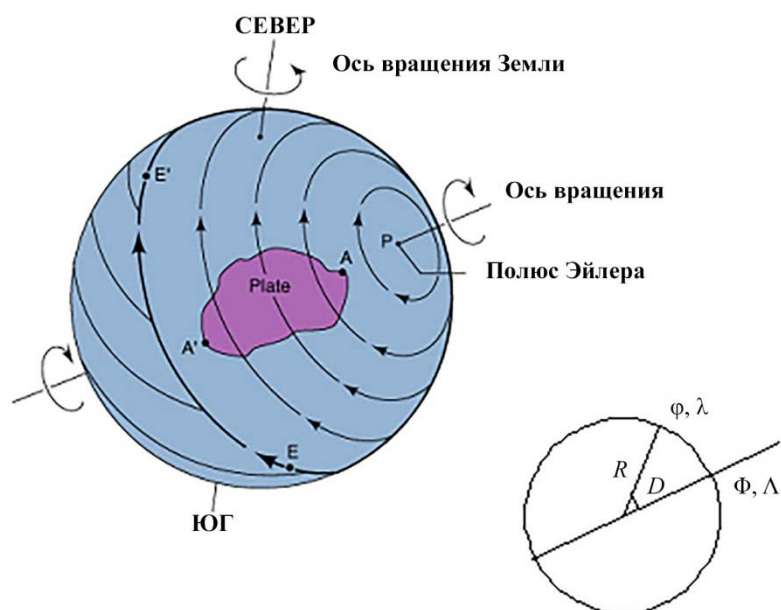


Рис. 3. Движение плит на сфере. Положение полюса Эйлера – координаты Φ, Λ ; пункта на плите – координаты φ, λ ; R – радиус Земли; D – эпицентральный угол

В модели использованы следующие параметры: координаты полюса Эйлера, Φ – широта (с. ш.), Λ – долгота (в. д.) и ω – угловая скорость вращения в градусах за миллион лет и координаты пункта наблюдений.

В рамках модели движения плит для определения скоростей горизонтальных смещений пункта с координатами φ и λ используются следующие соотношения:

$$V = \Omega \cdot R \cdot \sin D, \quad (1)$$

где Ω – угловая скорость в радианах; R – радиус Земли; D – эпицентральный угол; $D = \arccos [\sin \varphi \cdot \sin \Phi + \cos \varphi \cdot \cos \Phi \cdot \cos (\Lambda - \lambda)]$,

$$V = 11,12 \cdot \sin D \cdot \omega \text{ (см в год и градус в миллион лет)}. \quad (2)$$

Горизонтальная скорость на север

$$V_n = V \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

скорость на восток

$$V_e = V \cdot \cos \alpha,$$

где $\alpha = \arctg \sin(\lambda - \Lambda) / \{ [\sin(90 - \varphi) / \operatorname{tg}(90 - \Phi)] - \cos(90 - \varphi) \cdot \cos(\lambda - \Lambda) \}$.

Координаты обратного полюса: $\Phi_{pi} = -\Phi_p$, $\Lambda_{pi} = \Lambda_p + 180$.

Одна из первых известных тектонических моделей NNR-NUVEL была построена по комплексу геологических и геофизических данных [3, 4].

В настоящее время бурное развитие спутниковых методов исследований и вычислительной техники позволило получать и обрабатывать данные о параметрах смещения плит, величинах физических полей и их вариациях на поверхности Земли. Экспериментальные данные используются для создания новых моделей.

Навигационные системы

Относительно дешевая и мобильная система спутниковой геодезии – глобальная навигационная система (GPS – Global Positioning System) с искусственными источниками сигналов, широкое развитие получила в 1990-е гг. Обработка результатов измерений, например, для станции NVSK-Новосибирск проводится с использованием специальных программ относительно постоянных станций Евразии. Высокая точность достигается после учета различных поправок (приливных, за движение полюса и спутниковых) в процессе постобработки данных. Далее получаем скорости смещения станций, которые включают скорости смещения плиты в целом (т. е. вращение на сфере) и аномалии скоростей, связанные со смещениями и деформированием земной коры в

тектонически активных регионах. Аномальные скорости получаем вычитанием эффекта движения плиты, при этом используется либо модель вращения плиты, либо решение по близкой постоянной станции, или обнулением скорости смещения постоянных станций Евразии, расположенных севернее ее деформируемой южной части. В последнем случае полагаем, что опорные пункты отражают движение Евроазиатской плиты в этом регионе и минимально деформируются.

Постоянная станция и результаты измерений

Проиллюстрируем последние положения на примере вычисления скорости движения постоянной станции NVSK, заложенной в июле 2000 г. на сейсмостанции Ключи в 10 км от г. Новосибирска. Здесь использовался геодезический двухчастотный приемник TRIMBLE 4700. Получив первые материалы наблюдений, была проанализирована эпоха: сентябрь 2000 г. – октябрь 2002 г. Определения проводились относительно постоянных станций Азии. При анализе в различных научных центрах используются специальные программные пакеты, наиболее распространенные – GAMIT-GLOBK и BERNESE [5, 6]. Станции включены в международную систему IGS (International GPS Service), а положение станции NVSK рассматривается в системе ITRF2000 (рис. 4).

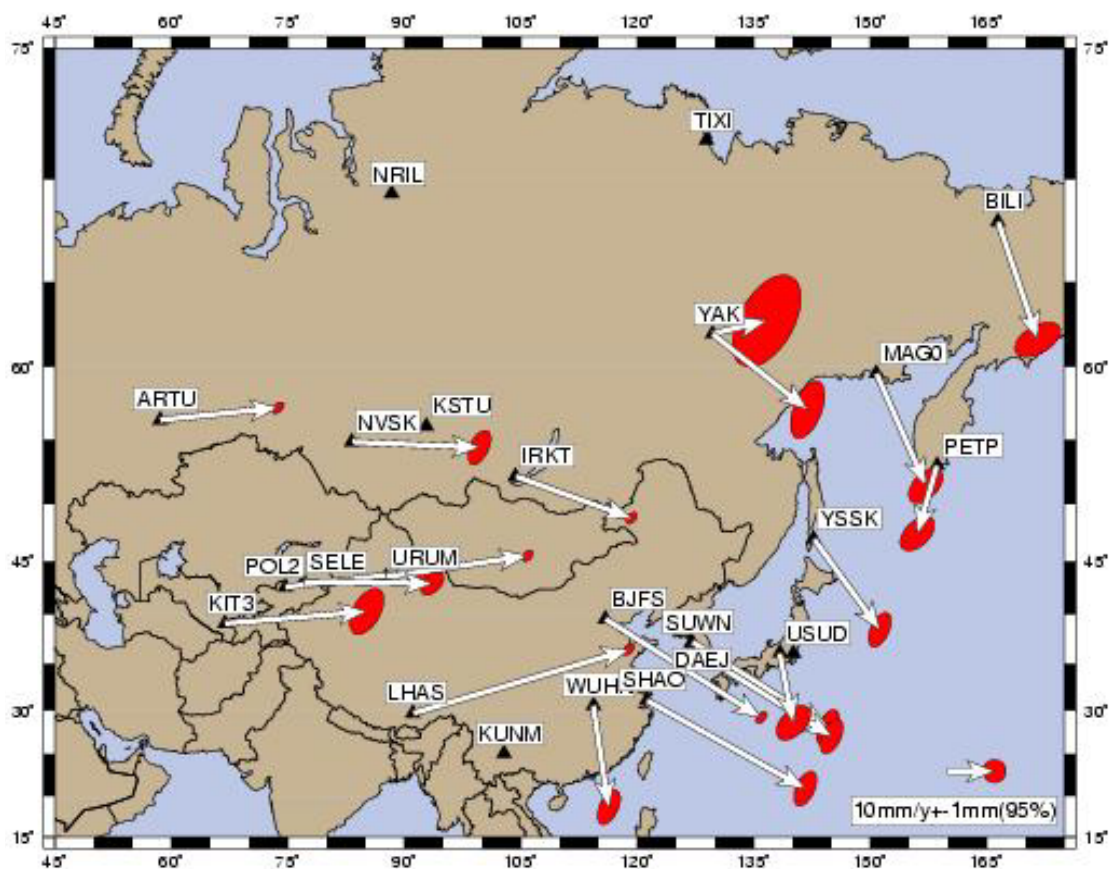


Рис. 4. Скорости смещения для постоянных станций Азии в геоцентрической системе с ошибками в эпоху сентябрь 2000 г. – октябрь 2002 г.

Первый анализ проводился по программе BERNESE 4.2 для периода июль 2000 г.– август 2002 г. Рассмотрение реальных материалов по постоянным станциям сети на данный период показало плохое качество материалов по отдельным станциям в отдельные периоды (KSTU, KUNM, TSKB, NRIL, TIXI) и они были исключены из анализа (рис. 4). Стратегия анализа аналогична используемой при обработке европейских станций системы EUREF. Первый шаг – суточные свободные сетевые решения обрабатывались с использованием L3 свободных от влияния ионосферы двойных разностей для фазовых смещений. В среднем 70 % неоднозначностей фиксировалось, используя квазиионосферный метод (QIFM). Информация об орбитах и параметрах вращения получена по данным системы IGS. Результаты анализа суточных данных сохранялись в SINEX-файлах. На втором шаге SINEX-файлы комбинировались, используя ADDNEQ-утилиты из программы BERNESE, в общее решение, в котором разрешались координаты и скорости. Геодезические данные для этого решения определялись из сети в системе ITRF2000 для станций ARTU, BJFS, IRKT, URUM и LHAS. Соответствие между оцениваемой сетью и ITRF2000 составило 1 см.

Координаты станции NVSK в геоцентрической системе для эпохи 01.08.2001 составили при ошибке в компонентах 3 и 4 мм (северная и восточная, соответственно) и 12 мм для вертикальной:

$$X = 433605.775 \text{ м}; Y = 3655558.526 \text{ м}; Z = 5191286.713 \text{ м},$$

и скорости $V_x = -27$ мм/год, $V_y = 4$ мм/год, $V_z = -1$ мм/год или координаты в градусах $54.840611066^\circ N$, $83.235443056^\circ E$, высота 123199.30 мм и скорости на земной поверхности $V_N = -1$ мм/год, $V_E = 27$ мм/год, $V_U = 0$ мм/год. В расчетах был использован референц-эллипсоид для широты и долготы, а высота определялась относительно модели WGS84.

Соответствие полученной скорости плитного движения станции NVSK, полученной на интервале с середины 2000 г. по середину 2004 г., известным моделям проверялось позднее (табл. 1).

Таблица 1

Модели смещения Евразийской плиты и экспериментальные данные для станции NVSK

Модель / измерения	Скорость V_N (на юг), мм/год	Скорость V_E (на восток), мм/год	Вертикальная скорость, мм/год	Абсолютная величина вектора, мм/год
1. Геодезическая модель ARKIM-2000	-0,1	26,5	0	26,5
2. Модель геолого-геофизическая NNR-NUVEL-1A	-4,4	24,6	0	25,0
3. Экспериментальные значения (2000–2004 гг.)	-2,4 $\pm 0,1$	24,9 $\pm 0,2$	+0,6 $\pm 0,4$	25,0 $\pm 0,2$

Окончание табл. 1

Модель / измерения	Скорость V_N (на юг), мм/год	Скорость V_E (на восток), мм/год	Вертикальная скорость, мм/год	Абсолютная величина вектора, мм/год
Разность по сравнению с моделями				
1 – 3	+2,3	+1,6		+1,5
2 – 3	-2,0	-0,3		-0,0

Использовались геолого-геофизическая модель плитного движения Евразии NNR-NUVEL-1A [3, 4] и модель APKIM-2000, полученная по результатам постоянных станций Евразии [7]. Как показано в табл. 1 для станции NVSK, отклонения моделей от данных эксперимента достигают 2 мм.

Использование результатов

Рассмотрим пример использования постоянных станций для определения значений остаточных векторов смещений для пунктов Азии. Анализ остаточных векторов проводился по сетям Восточного Казахстана, Алтая, Тувы, Байкальской рифтовой зоны и Монголии с включением постоянных станций Азии (Китай и Индия). Вычисления проводились по данным, полученным до 2003 г., относительно постоянных станций севера Евразии. Постоянные станции, относительно которых проводились вычисления, выделены квадратами на рис. 5. Различные варианты анализа представлены на рисунке разным цветом [8]. Из полученных результатов наиболее сильно проявляется влияние движения на ССВ Индийской плиты (50 мм/год). К северу эта ориентация смещений сохраняется, при этом уменьшается скорость смещения, которая исчезает на платформах Сибири.

Результаты обработки данных, полученных на постоянных станциях измерений и на сетевых пунктах ежегодного опроса, показали, что для одной эпохи (например, 2000–2001 гг.) получаем для горизонтальных скоростей ошибку 2,0–2,5 мм. Счет, включающий две эпохи, приводит к ошибке определения горизонтальных скоростей 0,9–1,3 мм, для вертикальных – 3,7–4,9 мм; три эпохи – 0,6–0,9 и 2,4–3,3 мм. При увеличении количества эпох наблюдений до 4-5 ошибка уменьшается до 0,3–0,4 мм, при этом ошибка для вертикальных скоростей в 3–4 раза превышает горизонтальную ошибку. Так, для эпохи 1 января 2004 г. координаты (в градусах), высота (в миллиметрах с ошибкой) и скорости (в мм/год с ошибкой) показаны в табл. 2. В эту эпоху координаты станции определены до долей миллиметра.

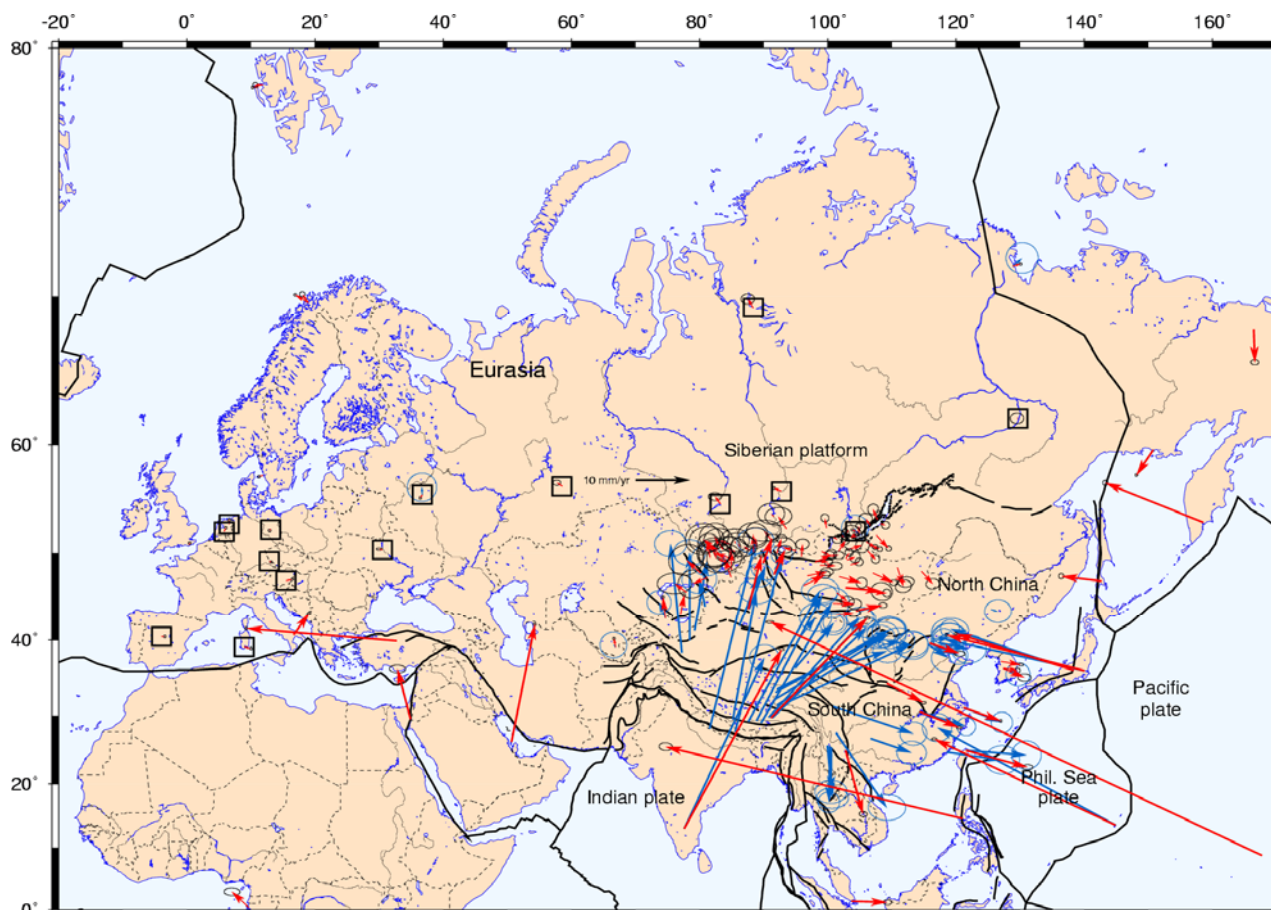


Рис. 5. Смещение станций юга Азии относительно Евразии

Таблица 2

Координаты и скорости смещений для эпохи 1 января 2004 г.

Код станции	Широта, градусы	Долгота, градусы	Высота, мм	Ошибки, мм		
				0,20	0,30	0,66
NVSK координаты	54,840 610 993	83,235 443 799	123 165,40	0,20	0,30	0,66
NVSK скорости	-2,38 мм/год	24,94 мм/год	0,61 мм/год	0,13	0,19	0,42

Увеличение времени записи на пункте формально уменьшает ошибку, но, как показывает опыт, не изменяет приведенные выше значения. Скорости определялись в разных центрах (IGS или SOPAC), например, скорости для периода (2000.53-2009.70 – $1,2 \pm 0,3$ мм/год и $26,5 \pm 0,3$ мм/год). Эти заключения проиллюстрируем на примере результатов по станции NVSK за отдельные периоды с 2000 по 2015 г. (рис. 6 и 7).

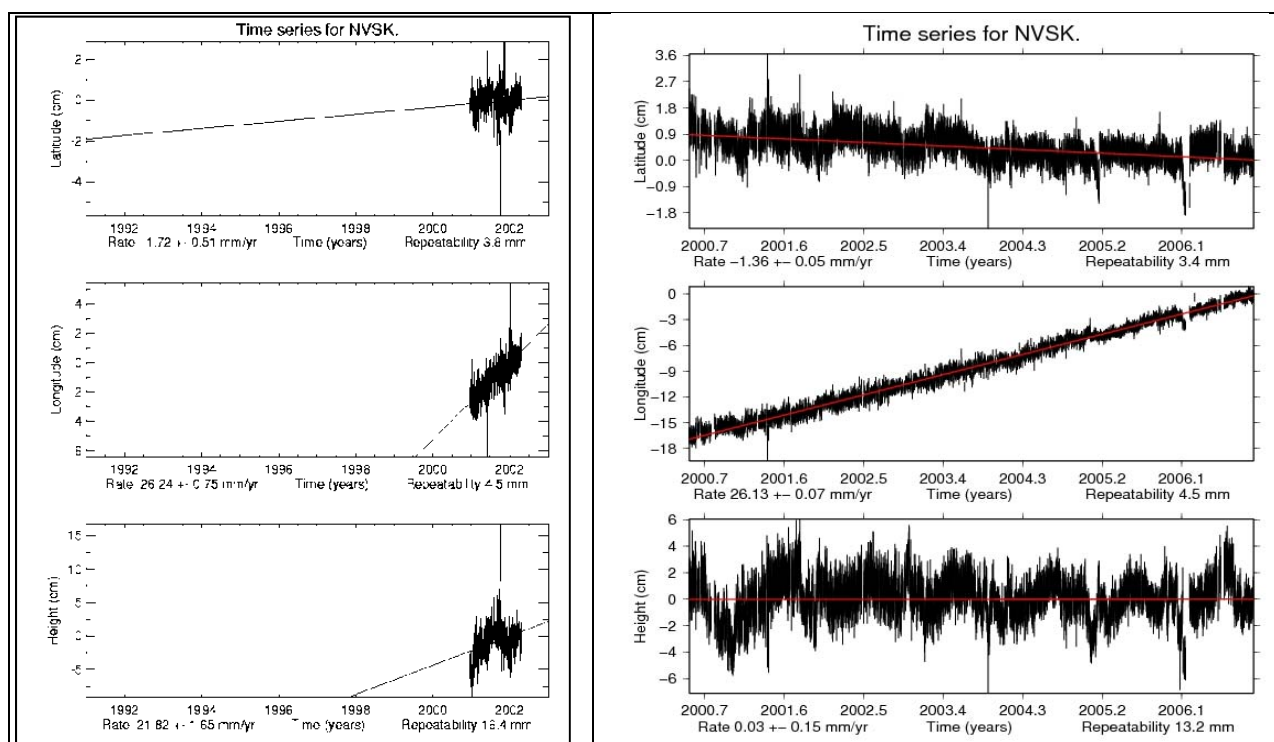


Рис. 6. Результаты обработки данных постоянной станции Ключи (NVSK). Два периода – период июль 2000 г. по февраль 2002 г. (шкала в см) и по июнь 2006 г. (вертикальная шкала в мм). Сверху вниз: смещение по долготе С-Ю, по широте В-З и вертикальное в миллиметрах

Заметим, что к 2006 г. горизонтальные скорости вышли на постоянное значение и далее сохранялись. Слабое отличие в 0,15 мм следует принять за возможности метода определения, вызванные метеорологическим влиянием.

Рассмотрим соответствие полученных на пункте результатов имеющимся моделям движения Евразии и выберем наиболее пригодную для нашего региона (Западной Сибири). Скорости горизонтальных движений по определению за эпоху 2000-2015 гг. составили: $-1,2$ и $26,3$ мм/год. Это значение можно принять за основу для станции NVSK. Как представлено в табл. 3 и 4, наиболее соответствует экспериментальным данным модель № 4 SH-2008. В начале 2016 г. произошла смена приемника на станции. Был установлен комплексный приемник ГЛОНАСС-GPS и начато накопление данных [10]. Как представлено на рис. 8, изменений координат за наблюдаемый период не отмечено, лишь для вертикальной компоненты отмечен слабый скачок, связанный со сменой антенны.

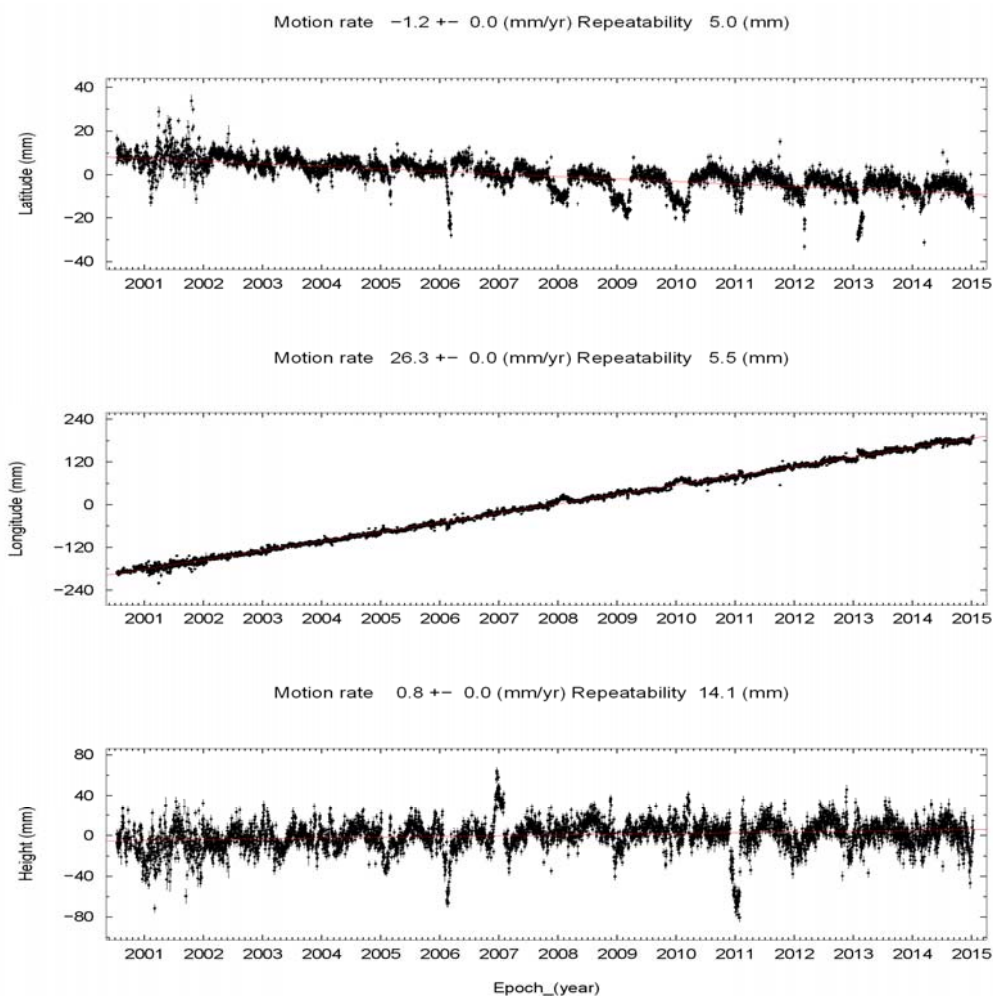


Рис. 7. Результаты обработки данных постоянной станции Ключи (NVSK), период июль 2000 г. – март 2015 г. Приведены значения скоростей (мм/год)

Таблица 3

Параметры полюса Эйлера
для различных моделей вращения Евразии [3, 4, 7, 9–12]

Модель	Широта, градусы	Долгота, градусы	Скорость вращения град./млн лет
1. APKIM-2000	57,9	262,9	0,258 7
2. CALE-2006	52,266	252,978	0,245
3. SOPAC-2008	55,851	262,622	0,263
4. SH-2008	54,2	259,3	0,251
5. ANI-2010	53,1	259,5	0,244
6. NNR-NUVEL-1A	50,631	247,725	0,233 7

Таблица 4

Скорости смещения пункта NVSK для моделей Евразии, экспериментальные значения и разность

Модель/измерения	Скорость V_N (на юг), мм/год	Скорость V_E (на восток), мм/год	Вертикаль- ная скорость, мм/год	Абсолютная величина век- тора смещения, мм/год
1. APKIM-2000	-0,089 3	26,529	0	26,5
2. CALE-2006	-2,956 9	25,714	0	
3. SOPAC-2008	-0,175 5	27,357	0	
4. SH-2008	-1,118 3	26,304	0	
5. ANI-2010	-1,061 1	25,784	0	
6. NNR-NUVEL-1A	-4,407 9	24,554	0	
				0,025 0
Экспериментальные значения (Э) (2000–2015 гг.)	-1,2 $\pm 0,0$	26,3 $\pm 0,0$	+0,8 $\pm 0,0$	0,025 0 $\pm 0,000 2$
Разность по сравнению с моделями				
1 – Э	+1,110 7	+0,229		-0,000 0
2 – Э	-1,756 9	-0,586		
3 – Э	+1,024 5	+1,057		
4 – Э	+0,081 7	+0,004		
5 – Э	+0,138 9	-0,516		
6 – Э	-3,207 9	-1,746		

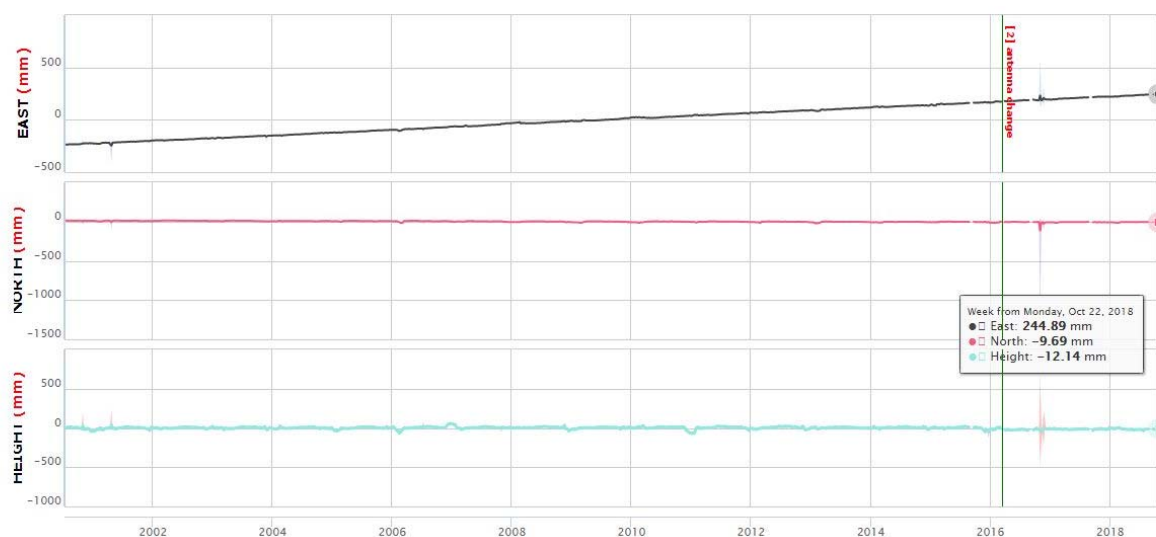


Рис. 8. Изменение координат станции NVSK с июля 2000 г. по октябрь 2018 г. Вертикальная ось – смещение в миллиметрах. В феврале 2016 г. – смена приемника

Заключение

Использование на постоянной станции (NVSK, номер 12319 в мировой геодинимической сети IGS) приемника TRIMBLE 4700 с июля 2000 г. по февраль 2016 г. позволило определить координаты с точностью до долей миллиметра. В результате многолетних GPS-наблюдений определены скорости горизонтальных смещений станции (–1,2 мм/год и 26,3 мм/год). Преимущественное смещение станции на восток со скоростью около 3 см в год. Выбрана модель вращения Евразийской плиты с координатами полюса Эйлера 54,2°N, 259,3°E и скоростью вращения 0,251 градус/млн лет. С 2016 г. станция переоснащена комплексным приемником ГЛОНАСС-GPS, что ставит новые метрологические задачи при исследованиях на станции NVSK, расположенной в пункте Ключи в 10 км от Академгородка г. Новосибирска, единственной станции такого уровня в Западной Сибири.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Boucher C., Altamimi Z., Sillard P. Results and analysis of the ITRF97 // IERS Technical note. – 1999. – No. 27. – P. 191.
2. Kreemer C. A, Blewitt G., Klein E. C. Geodetic plate motion and Global Strain Rate Model // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2014. – Vol. 15, No. 10. – P. 3849–3889.
3. DeMets C., Gordon R. G., Argus D. F. Geologically current plate motions // *Geophys. J. Int.* – 2010. – Vol. 181. – P. 1–80.
4. Drewes H. Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models // *Geodynamics, IAG Symposia* / M. Feissel (Ed.). – Springer, 1998. – P. 35–55.
5. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GAMIT Reference Manual. GPS analysis in MIT // Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. – Release 10.3. – 28 September 2006.
6. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program // Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. – Release 10.3. – 28 September 2006.
7. Boucher C. The ITRF 2000 // IERS Technical Note. – 2001. – No. 31. – 211 p.
8. GPS Measurements of active crustal deformation in Central Asia (Baikal-Mongolia-Altay) / E. Calais, O. Lesne, M. Vergnolee, J. Deverchere, V. Sankov, A. Likhnev, A. Miroshnitchenko, V. Buddo, K. Levi, V. Zalutski, Y. Baskkuev, M. Dembelov, S. Amarijargal, B. Bekhtur, V. Timofeev, A. Duchkov, M. Buslov, E. Zapreeva, D. Ardukov, G. Arnautov, G. Schelochkov, D. Bragin, A. Zubovich, B. Ducarme, C. Bruyminx, D. Delvaux // *Proceedings of the 2-d International Symposium on the Geodynamics and Environmental Problems of High-mountain Regions (October 2002).* – Kyrgyzstan, Bishkek : IPHT-Bishkek. – P. 50–58.
9. Continental Deformation in Asia from a Combined GPS Solution / E. Calais, L. Dong, M. Wang, Z. Shen, M. Vergnolle // *Geophysical Research Letters.* – 2007. – x-14. – doi: 10.1029/2006GL028433.
10. SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/sopac/>.
11. Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations. / N. Shestakov, M. Gerasimenko, H. Takahashi, M. Kasahara, V. Bormotov, V. Bykov, A. Kolomiets, G. Gerasimov, N. Vasilenko, A. Pryrkov, V. Timofeev, D. Ardyukov, T. Kato // *Geophysical Journal International.* – 2011. – Vol. 184, No. 2. – P. 529–540.

12. Plate boundaries in the Far East region of Russia (from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data) / V. Y. Timofeev, D. G. Ardyukov, V. M. Solov'ev, S. V. Shibaev, A. F. Petrov, P. Yu. Gornov, N. V. Shestakov, E. V. Boiko, A. V. Timofeev // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – Vol. 53. – P. 321–336.

Получено 28.12.2018

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков,
А. В. Тимофеев, Е. В. Бойко, 2019

PLATE TECTONIC THEORY AND NVSK PERMANENT SPACE GEODESY STATION RESULTS

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Dmitrii G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Elena V. Boyko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Akademik Koptyug Prospect, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Reseacher, phone (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Continuous geodetic dual frequency receiver measurements on permanent stations are used for most precise both coordinate and velocity measurement. GPS receiver TRIMBLE4700 measurement from July 2000 to February 2016 on the permanent station (NVSK, 12319 in IGS network) allows coordinate receiving with precision up to tenth of a percent. Horizontal movement speeds during long-term measurements reach $V_N = -1.2$ mm/y и $V_E = 26.3$ mm/y. Station displacement corresponds basic tectonic plate theories. Eurasia plate model with Euler pole coordinates 54.2°N , 259.3°E and rotation speed 0.251 degree /million-years is chosen. From 2016 station is reequipped with GLONASS-GPS receiver, what sets new metrological tasks at the NVSK station, located at the Kluchi seismic station 10 km from Academgorodok, Novosibirsk.

Key words: space geodesy, GLONASS-GPS, dual frequency receivers, tectonic plate models, horizontal movement rate.

REFERENCES

1. Boucher, C., Altamimi, Z., & Sillard, P. (1999). Results and analysis of the ITRF97. *IERS Technical Note*, 27, 191.
2. Kreemer, C. A, Blewitt, G., & Klein, E. C. (2014). Geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochem. Geophys. Geosyst*, 15(10), 3849–3889.

3. DeMets, C., Gordon, R. G., & Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int*, 181, 1–80.
4. Drewes, H. (1998). Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models. *Geodynamics, IAG Symposia*. M. Feissel (Ed.) (pp. 35–55). Springer.
5. Herring, T. A., King, R. W., & McClusky, S. C. (28 September 2006). *GAMIT Reference Manual. GPS analysis in MIT. Release 10.3*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.
6. Herring, T. A., King, R. W., & McClusky, S. C. (28 September, 2006). *GLOBK Reference Manual. Global Kalman filter VLBI and GPS analysis program Release 10.3*. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.
7. Boucher, C. (2001). The ITRF 2000. *IERS Technical Note*, 31, 211 p.
8. Calais, E., Lesne, O., Vergnolee, M., Deverchere, J., Sankov, V., Lukhnev, A., Miroshnitchenko, A., Buddo, V., Levi, K., Zalutski, V., Baskkuev, Y., Dembelov, M., Amarijargal S., Bekhtur, B., Timofeev, V., Duchkov, A., Buslov, M., Zapreeva, E., Ardukov, D., Arnautov, G., Schelochkov, G., Bragin, D., Zubovich, A., Ducarme, B., Bruyminx, C., & Delvaux D. (2002). GPS Measurements of active crustal deformation in Central Asia (Baikal-Mongolia-Altay). *Proceedings of the 2-d International Symposium on the Geodynamics and Environmental Problems of High-mountain Regions (October 2002)* (pp. 50–58). Kyrgyzstan, Bishkek: IPHT-Bishkek.
9. Calais, E., Dong, L., Wang, M., Shen, Z., & Vergnolle M. (2007). Continental Deformation in Asia from a Combined GPS Solution. *Geophysical Research Letters*, x-14. doi: 10.1029/2006 GL028433.
10. SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center (n. d.). Retrieved from <http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/sopac/>.
11. Shestakov, N., Gerasimenko, M., Takahashi, H., Kasahara, M., Bormotov, V., Bykov, V., Kolomiets, A., Gerasimov, G., Vasilenko, N., Pryrkov, A., Timofeev, V., Ardyukov, D., & Kato, T. (2011). Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations. *Geophysical Journal International*, 184(2), 529–540.
12. Timofeev, V. Y., Ardyukov, D. G., Solov'ev, V. M., Shibaev, S. V., Petrov, A. F., Gornov, P. Yu., Shestakov, N. V., Boiko, E. V., & Timofeev, A. V. (2012). Plate boundaries in the Far East region of Russia (from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data). *Russian Geology and Geophysics*, 53, 321–336.

Received 28.12.2018

© V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov,
A. V. Timofeev, E. V. Boyko, 2019