

УДК 528.23:629.78

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-63-77

О СРАВНЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ И СКОРОСТЕЙ СМЕЩЕНИЯ ПУНКТОВ С ПОМОЩЬЮ ДВУХЧАСТОТНЫХ ПРИЕМНИКОВ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ

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, зав. лабораторией, 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

Максим Георгиевич Валитов

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, кандидат геолого-минералогических наук, зав. лабораторией, e-mail: maxval@mail.ru

Юрий Федорович Стусь

Институт автоматки и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: yfstus@academ.org

Игорь Сергеевич Сизиков

Институт автоматки и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, инженер, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Дмитрий Алексеевич Носов

Институт автоматки и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер, e-mail: danossov@ngs.ru

Евгений Николаевич Калиш

Институт автоматки и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Для получения точных данных по координатам и скоростям смещений пунктов земной поверхности используются геодезические двухчастотные приемники с различными типами антенн. Информация о современных скоростях смещения пунктов земной поверхности необходима при построениях теории плитной тектоники Земли, при вычислениях скорости деформирования отдельных геологических структурных элементов. Обычно анализ скоростей смещений по большим территориям проводится с использованием данных, полученных различными приемниками. При проведении мониторинга смещений на миллиметровом уровне точности необходимо проанализировать особенности, возникающие при смене антенн и приемников космической геодезии. В работе рассматриваются результаты многолетних измерений различными системами на пунктах, расположенных на юге Западной Сибири (Ключи – Новосибирск – NVSK, Артыбаш, Усть-Кан) и в Приморье (полуостров Гамова, мыс Шульца). Наблюдения выполнены с помощью комплектов приемников космической геодезии Trimble-4700, Trimble R7 GNSS, Sokkia и Javad. При анализе с использованием пакета программ GAMIT-GLOBK получены значения координат в различные эпохи измерений. Расхождения в координатах, полученных разными системами, составляют от 2 до 10 мм. Сходимость определений на разных пунктах 1–3 мм. Для высотных определений расхождения составили от 10 до 30 мм. Они связаны с положением фазового центра антенн разного типа. Определение многолетних скоростей смещения пунктов показало хорошую сходимость. На юге Приморья расхождение скорости горизонтального смещения с моделью движения Евразийской тектонической плиты связано с постсейсмической релаксацией после катастрофического землетрясения в Японии 11.03.2011 ($M = 9.1$).

Ключевые слова: космическая геодезия, двухчастотные приемники, координаты пункта, скорость горизонтальных смещений, модели тектоники плит.

Введение

Измерения координат пункта на уровне миллиметра и долей миллиметра необходимы при мониторинге смещений в сейсмоактивных областях, измерениях на вулканах, в зонах оползней и крупных промышленных объектов, при кадастровых работах [1–4]. Информация о современных скоростях смещения, полученных при измерениях на постоянных пунктах международной сети в различных районах Земли, используется при создании навигационных систем ITRF (эпохи от 1997 г. и далее), при построениях теории плитной тектоники Земли [5–8], при вычислениях скорости деформирования тектонических плит и отдельных геологических структурных элементов [9, 10]. Используя распределение скоростей косейсмических смещений в разных частях эпицентральной зоны, можно получить параметры очага землетрясения (характер подвижки, тип землетрясения, энергию – магнитуду, глубину гипоцентра) [11]. Многолетние измерения постсейсмических смещений позволяют определять вязкие параметры земной коры и мощность упругой верхней ее части [12, 13]. Данные об изменениях скорости смещений перед землетрясениями позволяют надеяться на создание теории прогноза землетрясений. Обычно анализ скоростей смещений проводится с использованием данных, полученных различными приемниками. При этом применяются двухчастотные геодезические приемники космической геодезии различных марок и систем с использованием оригинальных антенн.

Важно оценить надежность параметров, получаемых различными типами приемников, определить возможности взаимозаменяемости систем измерений при многолетнем мониторинге смещений на реперах различной конструкции. Задачей нашей работы являлось сравнение точности определения координат и значений многолетней скорости смещения пунктов при использовании различных комплектов приемников космической геодезии.

Технология и результаты измерений

Исследования выполнялись с использованием материалов многолетних измерений, полученных на четырех пунктах наблюдений с двухчастотными приемниками космической геодезии различных типов [14]. Измерения проводились на сейсмостанциях и научных полигонах (табл. 1, рис. 1, 2), расположенных в Западной Сибири и на юге Приморья [15, 16]. При проведении наблюдений использованы следующие комплекты приемников космической геодезии: приемник Trimble 4700 с антенной Trimble Micro Centered L1/L2 (далее в тексте «Т-4700»), приемник Sokkia Radian GePos 24 с антенной Novatel 600-G L1/L2 (далее – «Соккия»), приемник JAVAD TRE_G3T SIGMA с антенной JAV_GRANT-G3T, External GPS L1/L2/L5, GLO L1/L2, GAL E1/E5A (далее в тексте – «Джавад»), приемник Trimble R7 GNSS с антенной Zephyr Model 2 Geodetic (далее в тексте – «Т-Р7») и система GPS. На всех пунктах применялась жесткая центровка антенн. Оборудование пунктов на станциях осуществлялось исходя из местных условий.

Таблица 1

Координаты пунктов измерений, расположенных на сейсмостанциях Западной Сибири и Приморья

Пункт наблюдений	Широта	Долгота	Высота
Ключи (NVSK)	54.840°	83.235°	123 м
Усть-Кан	50.939°	84.768°	1 004 м
Артыбаш	51.798°	87.281°	461 м
Мыс Шульца	42.582°	131.155°	78 м

На сейсмостанции Ключи (в 8 км от Академгородка, г. Новосибирск) массивная железная конструкция (рис. 1) для установки антенн закреплена на стене (толщиной 900 мм) здания сейсмостанции постройки 1960-х гг. Внутри этой части здания расположена капитальная термокамера с четырьмя гравиметрическими постаментами. Пункт космической геодезии был оборудован в июне 2000 г. Гравиметрические измерения с приливными и абсолютными гравиметрами проводятся с 1970-х гг.

В Горном Алтае на территории сейсмостанции Усть-Кан на скальных выходах оборудованы два пункта наблюдений (см. рис. 1). Наземный скальный

репер заложен в 2000 г., репер на штанге (заложен в 2004 г.) находится в 45 м западнее первого.

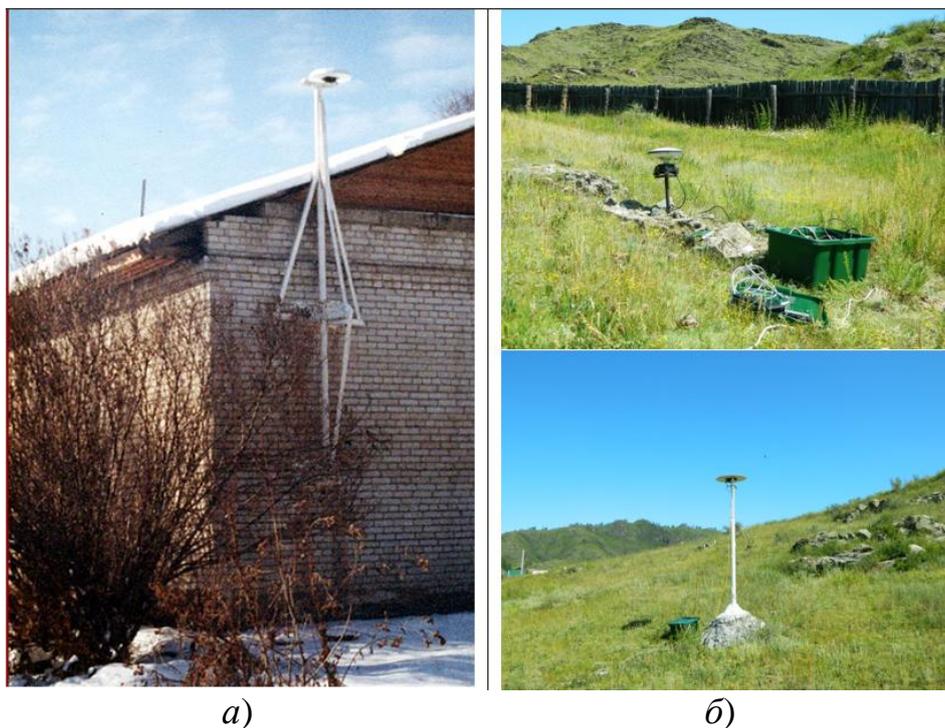


Рис. 1. Штанги для размещения антенн на пунктах Ключи и Усть-Кан: *a)* положение антенны на пункте наблюдений на сейсмостанции Ключи – NVSK (окрестности г. Новосибирск); *б)* положение антенн на пунктах сейсмостанции Усть-Кан «Скальный» и «Штанга»

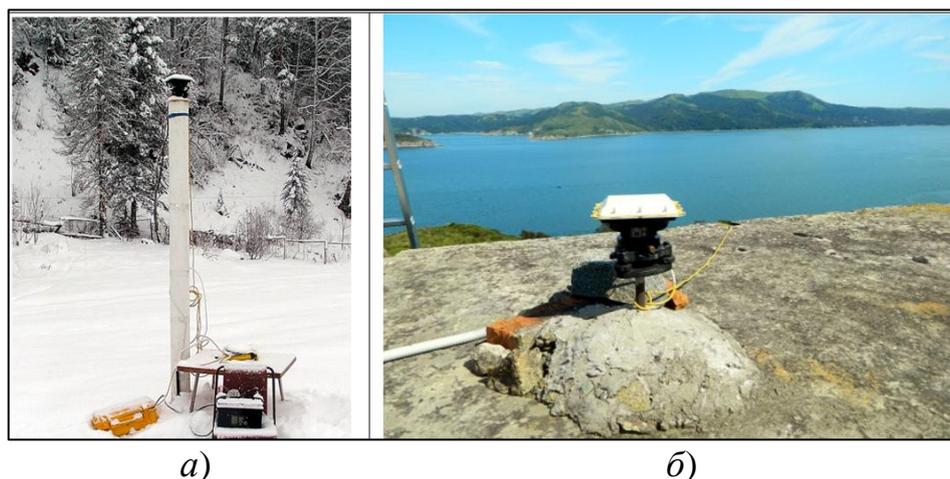


Рис. 2. Штанги для установки антенн на пунктах Артыбаш и Мыс Шульца: *a)* положение антенны на пункте наблюдений на сейсмостанции Артыбаш (Телецкое озеро, Горный Алтай); *б)* положение антенны на научном полигоне «Мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН

На сейсмостанции Артыбаш скальный репер у подножия горного склона из-за ограниченной видимости спутников оказался непригодным для наблюдений. Поэтому в 2001 г. на территории станции на террасе был построен классический глубинный репер, т. е. на глубине 3 м заливался бетонный постамент (3 м^3), в котором закреплена выходящая на поверхность шестиметровая обсадная труба с приваренным наконечником (см. рис. 2). Грунт на террасе – мелкий песок, постамент расположен в слое из крупного водоносного песка. Северо-восточнее пункта находится залесенный склон горы природоохранной зоны Телецкого озера (Горный Алтай).

На юге Приморья работы проводились на полуострове Гамова. Пункт на научном полигоне «Мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН был оборудован в 2012 г. на крыше шестиметрового здания (см. рис. 2).

Измерения на пунктах проводились с использованием триггеров и без них. Обычно длительность наблюдений составляла от одной до нескольких недель, количество каналов записи (регистрируемых спутников) от четырех и более, использовались маски от 0 до 15° . Сравнение результатов различных приемников космической геодезии «Т-4700» и «Соккии» проводилось на сейсмостанциях Горного Алтая. Антенна Trimble MicroCentered обычно применялась с защитным отражателем, что уменьшает влияние отражений сигнала и повышает точность и надежность измерений. На пункте Артыбаш проанализированы результаты ежегодных измерений, выполненных в июле – августе, что уменьшает влияние сезонных искажений на результаты. Начиная с 2001 г., наблюдения на пункте выполнялись системой «Т-4700», а в 2004 г. измерения дополнены наблюдениями системой «Соккия». Обычно в анализе используются серии наблюдений длительностью от трех суток до месяца. Обработка проводилась программным пакетом GAMIT-GLOBK [17, 18] с использованием данных постоянных станций сети IGS (до 20 пунктов). В результате анализа и сравнения результатов, полученных разными приемниками, получены расхождения по отдельным координатам от 2 до 10 мм (табл. 2), а сравнение по скоростям на периоде измерений 2001–2012 гг. показало хорошее совпадение результатов (рис. 3).

Таблица 2

Разность значений координат пункта Артыбаш, определенных по данным измерений приемниками «Соккия» и «Т-4700». Антенна последнего устанавливалась на триггере

Год	Разность по широте (мм)	Разность по долготе (мм)	Разность по высоте (мм)
2004	-5,5	+9,6	-83,2
2005	-6,8	+12,2	-92,4
2007	-8,1	+13,6	-85,1
2009	-2,5	+12,4	-82,0
2010	-4,0	+6,8	-85,3
Среднее	-5,3	+10,9	-85,6 + 75,0 (высота триггера) = -10,6

Расхождение результатов по долготе связано с наличием залесенного холма на северо-западе, что может приводить к псевдоотражениям, регистрируемым системой «Соккия». Антенна системы «Т-4700» снабжена отражателем, что уменьшает искажения сигнала. Она устанавливалась с использованием триггера, что отразилось в значении высоты пункта. Также в высоте проявилась разница в положении фазового центра антенн.

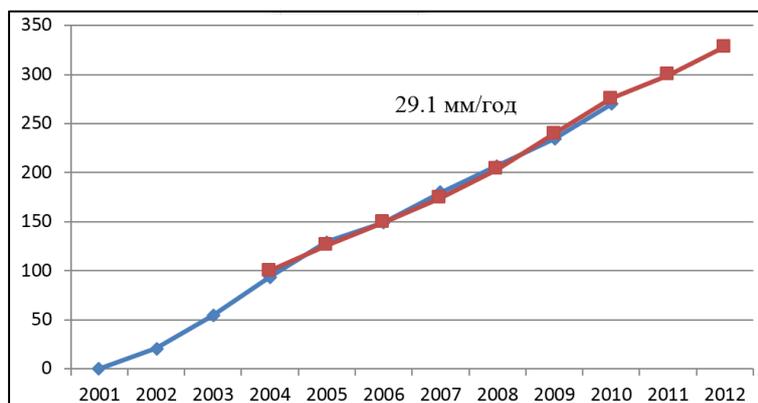


Рис. 3. Смещение пункта Артыбаш на восток в миллиметрах по данным измерений с 2001 по 2012 г.: синий ряд – «Т-4700»; коричневый ряд – «Соккия»

На сейсмостанции Усть-Кан (Горный Алтай) ежегодные измерения проводятся с 2000 г. системой «Т-4700» на скальном пункте (см. рис. 1). В 2004 г. был оборудован штанговый пункт, расположенный на поверхностном выходе скальных пород. С 2005 г. измерения проводятся на двух пунктах с использованием двух систем наблюдений. На графике (рис. 4) приведены результаты анализа, показывающие смещение на восток, по данным измерений на пунктах «Скальный» с 2000 по 2019 г. и на пункте «Штанга» с 2005 г.

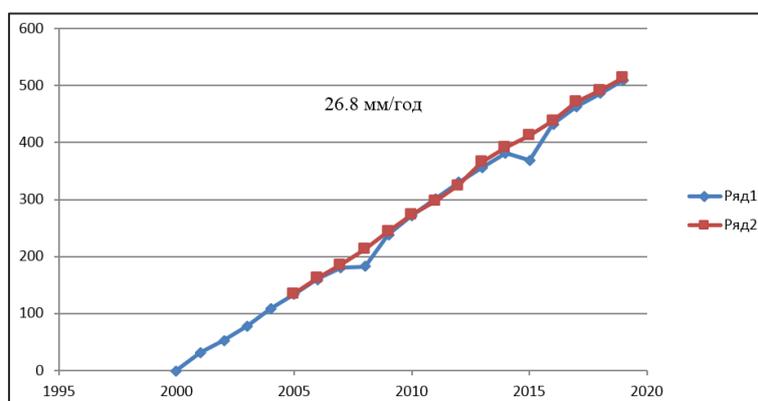


Рис. 4. Смещение пунктов Усть-Кан на восток в миллиметрах по данным измерений с 2000 по 2019 г.:

синий ряд 1 – «Т-4700» по измерениям на пункте «Скальный»; коричневый ряд 2 – «Соккия» по измерениям на пункте «Штанга»

Скорость смещения пункта на восток (26,8 мм/год) оказалась одинаковой (см. рис. 4) по определениям на двух пунктах, разнесенных на 45 м. В последние годы исследовались результаты наблюдений приемниками «Соккия» и «Т-4700», установленными на двух пунктах (табл. 3 и 4, см. рис. 1) одновременно. Можно отметить, что расхождения по широтной координате составили несколько миллиметров (–2,6 и –4,9), что хорошо согласуется с данными измерений на пункте Артыбаш (–5,3). Различия по долготной координате составили около 2 мм. Разность по высоте (–8,2 и –7,0) в пределах ошибки совпадает со значением, приведенным в табл. 2.

Таблица 3

Разность значений координат пункта Усть-Кан (скальный), определенных по данным измерений приемниками «Соккия» и «Т-4700»

Год	Разность по широте (мм)	Разность по долготе (мм)	Разность по высоте (мм)
2016	–3,0	–1,6	–8,1
2017	–2,6	–1,9	–9,1
2018	–2,0	–2,5	–4,5
2019	–2,8	–1,7	–11,3
Среднее	–2,6	–1,9	–8,2

Таблица 4

Разность значений координат пункта Усть-Кан (штанга), определенных по данным измерений приемниками «Соккия» и «Т-4700»

Год	Разность по широте (мм)	Разность по долготе (мм)	Разность по высоте (мм)
2016	–6,8	–2,6	–5,8
2017	–8,2	–1,4	–5,6
2018	–2,6	–2,5	–8,4
2019	–1,8	–3,6	–8,1
Среднее	–4,9	–2,5	–7,0

Измерения на юге Приморья на полуострове Гамова начаты в 2012 г., приемником «Т-4700», а с 2016 г. постоянные наблюдения проводятся также приемником «Джавад». Результаты анализа данных, полученных на научном полигоне «Мыс Шульца», на пункте, показанном на рис. 2, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Разность значений координат пункта «Мыс Шульца» по данным измерений приемниками «Джавад» и «Т-4700» (антенна на триггере)

Год	Разность по широте (мм)	Разность по долготе (мм)	Разность по высоте (мм)
2016	–9,1	–4,3	$78533,5 - 78607,4 = -73,9$
2017	–6,4	–3,8	$78536,9 - 78606,9 = -70,0$
2018	–8,8	–5,1	$78534,2 - 78607,0 = -72,8$
Среднее	–8,1	–4,4	$-72,2 + 75 = +2,8$

В результате анализа двух систем измерений получено расхождение по широтной координате в 8,1 мм, а по долготной в 4,4 мм. С учетом высоты триггера, расхождения по высоте составили 2,8 мм, что отражает ошибку измерений. Скорости смещений, определенные разными системами, оказались одинаковы. На рис. 5 и 6 приведены графики изменения смещений по широте и долготе.

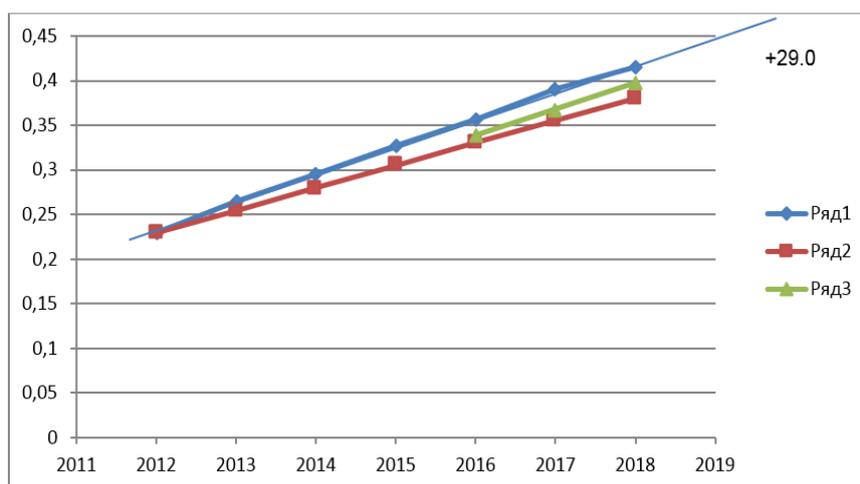


Рис. 5. Смещение пункта «Мыс Шульца» на восток в миллиметрах по данным измерений с 2012 по 2018 г.:

синий ряд 1 – «Т-4700»; коричневый ряд 2 – смещение по модели Евразии [19]; зеленый ряд 3 – смещение по результатам измерений системы «Джавад»

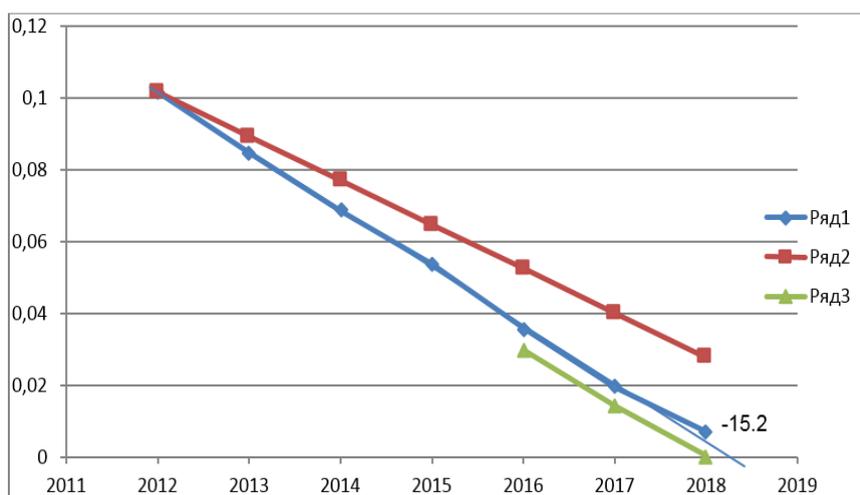


Рис. 6. Смещение пункта «Мыс Шульца» на юг в миллиметрах по данным измерений с 2012 по 2019 г.:

синий ряд 1 – «Т-4700»; коричневый ряд 2 – смещение по модели Евразии [19]; зеленый ряд 3 – смещение по результатам измерений системы «Джавад»

Обычно экспериментальные данные сравниваются с моделями вращения Евразии [3, 5–8, 19, 20]. Так, на рис. 5 и 6 приведены графики смещений, вычисленные по модели движения Евразии (SOPAC-2008 [19]: $-12,302$ мм/год (N), $25,177$ мм/год (E)). Разность экспериментальных и модельных значений скоростей отражает постсейсмические смещения после Японского землетрясения 11.03.2011, $M = 9$ [21]. Они составляют за 6 лет: $-13,3$ мм на юг и $35,3$ мм на восток, вектор смещений 38 мм на ЮВВ в направлении на эпицентр землетрясения.

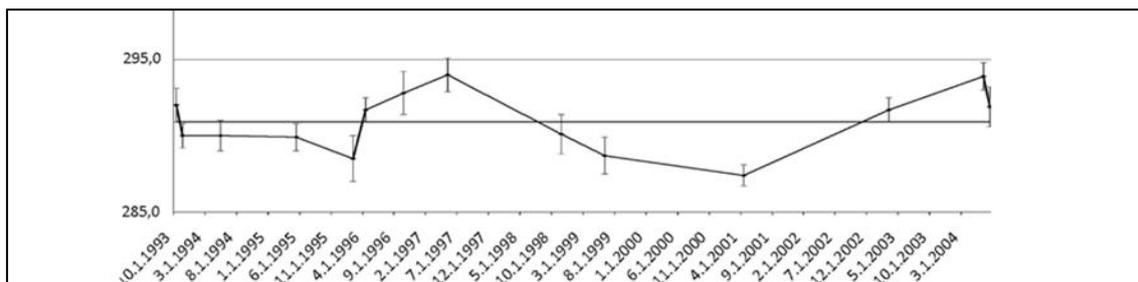
Измерения на постоянном пункте международной сети IGS Ключи–NVSK начаты в июле 2000 г. с использованием приемника «Т-4700». Результаты определения горизонтальной скорости смещения пункта за период 2000–2015 гг. составили: $-1,20 \pm 0,03$ (N) мм/год и $+26,3 \pm 0,03$ (E) мм/год. В 2016 г. приемник TRIMBLE-4700 был выведен из эксплуатации, а станция NVSK оснащена комплексным приемником ГЛОНАСС-GPS (Trimble R7 GNSS, антенна Zephyr Model2, L1/L2/L5 G1/G2 Geodetic, обозначим его как «Т-Р7»). Новая антенна была установлена в том же месте, что и предыдущая. Значения скоростей, полученных системой «Т-Р7» (период 2016–2019 гг.), составили: $-1,14$ (N) мм/год и $26,48$ (E) мм/год. Полученные скорости хорошо соответствуют современным моделям смещений Евразии [19]. Высотная компонента достаточно стабильна по определениям методами космической геодезии (значение, полученное летом 2001 г., составило $123,098\ 47$ м, а летом 2015 г. $123,100\ 205$ м).

Стабильность высоты подтверждается и измерениями, выполненными на пунктах в Ключах и в Академгородке с помощью абсолютных гравиметров ГАБЛ разработки Института автоматики и электрометрии СО РАН (рис. 7).

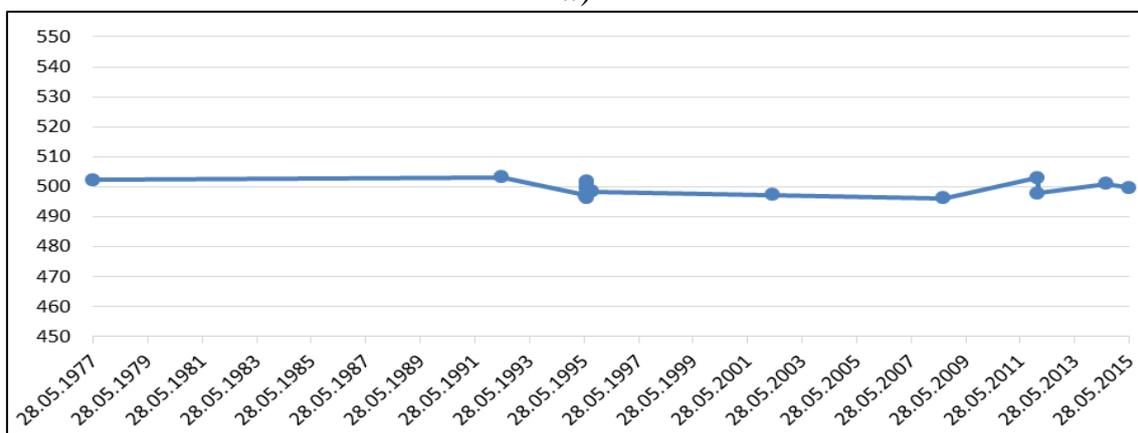
Наблюдения выполнялись разными модификациями абсолютного гравиметра от ГАБЛ до ГАБЛ-М и ГАБЛ-П. Введены все поправки [22–24]. Отклонения от среднего в итоге составляют 4 мкгал. Период наблюдений 38 лет, т. е. можно оценить стабильность параметра на уровне $0,1$ мкгал в год.

В итоге приходим к выводу, что по экспериментальным данным, полученным с 1977 по 2015 г., стабильность значения силы тяжести на пункте следует оценить как $0,1$ мкгал в год, что в пересчете на вертикальные смещения дает $0,3$ мм в год.

Сравнение определений высоты в эпохи 2012–2015 гг. и 2016–2019 гг. показало отклонение на 29 мм, что свидетельствует о разном положении фазовых центров у антенн «Т-4700» и «Т-Р7» (табл. 6). При выполнении измерений использованы разные комплекты приемников (TRIMBLE-4700 и Trimble R7) и антенн.



а)



б)

Рис. 7. Измерения, выполненные с помощью абсолютных гравиметров ГАБЛ:

а) изменения силы тяжести по наблюдениям в подвале Института автоматики и электрометрии СО РАН (Академгородок, г. Новосибирск) с января 1993 г. по январь 2004 г. (микрогольная часть абсолютного значения);
 б) величина силы тяжести по наблюдениям в обсерватории Ключи (сейсмо-станция) за период с мая 1977 г. по июнь 2015 г. (микрогольная часть абсолютного значения)

Таблица 6

Результаты измерений высоты пункта NVSK–Ключи по ежегодным измерениям в июле – августе с 2001 г. по 2019 г.

Год измерений	Высота пункта (м)
2001	123,098 47
...	
2012	123,102 91
2013	123,100 08
2014	123,098 39
2015	123,100 21
А: среднее (2012–2015)	123,100 40
2016	123,070 75
2017	123,073 78
2018	123,068 90
2019	123,071 56
Б: среднее (2016–2019)	123,071 24
Разность А – Б	0,029 15

Заключение

В результате сравнения различных антенн и двухчастотных приемников космической геодезии, выполненного на материалах многолетних измерений на пунктах юга Сибири и Приморья, получены величины смещения координат. В целом, широтные и долготные компоненты изменяются от 2 до 10 мм. Открытость неба, использование триггера и наличие отражателей для уменьшения эффекта отражения сигналов несущих частот уменьшает изменения. Для вертикальной компоненты получены изменения от нуля до 29 мм. Отличия связаны с положением фазового центра различных типов антенн. Одним из важных параметров, используемых в геодинамических построениях, является годовая скорость смещения пункта наблюдений. В работе проведено сравнение современных скоростей смещения пунктов, расположенных на юге Западной Сибири и Приморья. Для четырех типов антенн и приемников в результате многолетних измерений получены значения скоростей смещений пунктов по широте, долготе и высоте. Все исследуемые системы показали хорошую сходимость в этих параметрах. Отмечена корректность современной модели смещения Евразии. Сравнение с модельными значениями смещений тектонической плиты Евразии позволяют определить величину постсейсмического смещения в дальней зоне (1 000 км до эпицентра) Японского землетрясения 11.03.2011 ($M = 9,1$). За шесть лет (2012–2018 гг.) смещения составили: $-13,3$ мм на юг и $35,3$ мм на восток, вектор смещений 38 мм на ЮВВ в направлении на эпицентр землетрясения. Они отражают постсейсмическую релаксацию после катастрофического землетрясения в Японии [21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интерпретации в ITRF / В. С. Вдовин, В. В. Дворкин, А. П. Карпик, Л. А. Липатников, С. Д. Сорокин, Г. М. Стеблов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 6–27.
2. Методика метрологической поверки ГНСС-приемников системы мониторинга высоконапорной ГЭС / А. П. Карпик, Н. С. Косарев, К. М. Антонович, А. П. Решетов, А. В. Устинов // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 34–43.
3. Теория плитной тектоники и результаты измерений на постоянной станции космической геодезии NVSK / В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Е. В. Бойко // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 95–108.
4. Аврунев Е. И., Вылегжанина В. В., Гиниятов И. А. Совершенствование кадастровых работ по уточнению границ ранее учтенных земельных участков // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 126–135.
5. Drewes H. Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models / M. Feissel (Ed.) // Geodynamics, IAG Symposium. – Springer, 1998. – P. 35–55.
6. Boucher C., Altamimi Z., Sillard P. Results and analysis of the ITRF97 // IERS Technical note. – 1999. – No. 27. – P. 191.
7. De Mets C., Gordon R. G., Argus D. F. Geologically current plate motions // Geophys. J. Int. – 2010. – Vol. 181. – P. 1–80.
8. Kreemer C., Blewitt G., Klein E. C. A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model // Geochem. Geophys. Geosyst. – 2014. – Vol. 15, No. 10. – P. 3849–3889.

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: 10.1029/2006 GL028433.
10. 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. – 184 (2). – P. 529–540.
11. Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations / N. Shestakov, H. Takahashi, M. Ohzono, A. Prytkov, V. Bykov, M. Gerasimenko, M. Luneva, G. Gerasimov, A. Kolomiets, V. Bormotov, N. Vasilenko, J. Baek, P-H. Park, M. Serov // *Tectonophysics*. – 2012. – Vol. 524–525. – P. 76–86.
12. Implications of deformation following the 2002 Denali, Alaska, earthquake for postseismic relaxation processes and lithospheric rheology / A. M. Freed, R. Burgmann, E. Calais, J. Freymueller, S. Hreinsdottir // *Journal of Geophysical Research*. – 2006. – Vol. 111, B01401. Doi: 10.1029/2005JB003894.
13. Spatial-temporal evolution and corresponding mechanism of the far-field post-seismic displacements following the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake / Q. Zhao, G. Fu, W. Wu, T. Liu, L. Su, X. Su, N.V. Shestakov // *Geophysical Journal International*. – 2018. – Vol. 214, No. 3. – P. 1774–1782.
14. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *GPS. Theory and Practice*. – Wien, New York : Springer-Verlag, 1994. – P. 355.
15. Goldin S. V., Timofeev V. Y., Ardyukov D. G. Fields of the earth's surface displacement in the Chuya earthquake zone in Gornyi Altai // *Doklady Earth Sciences*. – 2005. – Vol. 405A, No. 9. – P. 1408–1413.
16. Coseismic effects of the 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake measured at Far East Russia continental coast by gravity and GPS methods / V. Timofeev, R. Kulinich, M. Valitov, Y. Stus, E. Kalish, B. Ducarme, P. Gornov, D. Ardyukov, I. Sizikov, A. Timofeev, G. Gil'manova, T. Kolpashikova and Z. Proshkina // *International Journal of Geosciences*. – 2013. – No. 4. – P. 362–370. Doi: 10.4236/ijg.2012.
17. 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.
18. 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.
19. SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center [Electronic resource]. – Mode of access: <http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/sopac/>.
20. 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.
21. The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries / M. Simon, S. E. Minson, A. Sladen, F. Ortega, J. Jiang, S. E. Owen, L. Meng, J.-P. Ampaero, S. Wei, R. Chu, D. V. Helcuberger, H. Ranamori, E. Hetland, A. W. Moore, F. H. Webb // *Science*. – 2011. – Vol. 332, No. 6036. – P. 1421–1425.
22. Laser ballistic gravimeter GABL-M and gravity observation results / G. P. Arnautov, E. N. Kalish, M. G. Smirnov, Yu. F. Stus', V. G. Tarasyuk // *Avtometria*. – 1994. – No. 3. – P. 3–11.
23. Arnautov G. P. Results of international metrological comparison of absolute laser ballistic gravimeters // *Avtometria*. – 2005. – No. 41 (1). – P. 126–136.
24. Gravity and Displacement Variations in the Areas of Strong Earthquakes in the East of Russia / V. Y. Timofeev, E. N. Kalish, Y. F. Stus, D. G. Ardyukov, M. G. Valitov, A. V. Timofeev,

D. A. Nosov, I. S. Sizikov, E. V. Boiko, P. Y. Gornov, R. G. Kulinich, T. N. Kolpashchikova, Z. N. Proshkina, E. O. Nazarov, V. G. Kolmogorov // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2018. – Vol. 54, No. 3. – P. 430–443.

Получено 04.02.2020

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Е. В. Бойко,
М. Г. Валитов, Ю. Ф. Стусь, И. С. Сизиков, Д. А. Носов, Е. Н. Калиш, 2020

COMPARISON OF COORDINATES AND CURRENT RATES ESTIMATIONS BY DUAL FREQUENCY RECEIVERS OBSERVATION

Vladimir Ju. Timofeev

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

Dmitrii G. Ardyukov

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

Maksim G. Valitov

Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, 43, Baltiiskai St., Vladivostok, 690041, Russia, Ph. D., Chief of Laboratory, e-mail: maxval@mail.ru

Yurii F. Stus

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: yfstus@academ.org

Igor S. Sizikov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Dmitrii A. Nosov

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, e-mail: danossov@ngs.ru

Eugenii N. Kalish

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Engineer, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Dual frequency geodesy receivers with different antennas are used for precise data on coordinates and velocity measurement of stations on the Earth surface. Current rates data used for Earth Plate Tectonic calculation and for study of geology structure deformation. Rates analysis usually developed by different equipment data. Due to millimeter accuracy monitoring some peculiar properties, concerning usage and change of different antennas and space geodesy receivers, were used. We analyze annual measurement at West Siberia stations (Kluchi – Novosibirsk – NVSK, Artybash, Ust-Kan) and in Primorye (Gamov peninsula, Shults cape). Different types of hardware was used: TRIMBLE 4700 (antenna Trimble MicroCentered L1/L2, P/N), Sokkia Radian GePos 24 (antenna Nova Tel 600-G L1/L2), JAVAD TRE_G3T SIGMA (antenna JAV_GRANT-G3T, External GPS L1/L2/L5, GLO L1/L2, GAL E1/E5A) and Trimble R7 GNSS (антенна Zephyr Model2, L1/L2/L5, G1/G2 Geodetic). Coordinates of different epochs was calculated with GAMIT-GLOBK software. Coordinate differences, due to different receivers and antennas are 2–10 mm. Estimation of position for neighbouring marks differ from 1 to 3 mm. Vertical measurement divergences is 10–30 mm, caused by different phase centers locations for various antennas types. Long term horizontal rates display good convergence. Horizontal variance rates at south Primorye, according to Eurasian Tectonic plate is a result of catastrophic earthquake in Japan 03.11.2011 (M = 9,1) post-seismic relaxation.

Key words: space geodesy, dual frequency receiver, station coordinates, horizontal movement velocity, current rates, tectonic plate models.

REFERENCES

1. Vdovin, V. S., Dvorkin, V. V., Karpik, A. P., Lipatnikov, L. A., Sorokin, S. D., & Steblou G. M. (2018). Current state and future development of active satellite geodetic networks in Russia and their integration into ITRF. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(1), 6–27 [in Russian].
2. Karpik, A. P., Kosarev, N. S., Antonovich, K. M., Reshetov, A. P., & Ustinov, A. V. (2019). Method of metrological inspection of GNSS receivers of a high-connector HEPS monitoring system. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(4), 34–43 [in Russian]
3. Timofeev, V. Yu., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., & Bojko E. V. (2019). Plate tectonic theory and NVSK permanent space geodesy station results. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2), 95–108 [in Russian]
4. Avrunev, Ye. I., Vylegzhanina, V. V., & Giniyatov I. A. (2017). Improvement of cadastral works on specification of the boundaries of previously surveyed land parcels. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 126–135 [in Russian]
5. Drewes H. (1998). Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models. In *Geodynamics, IAG Symposia*. M. Feissel (Ed.) (pp. 35–55). Springer.
6. Boucher C., Altamimi, Z., & Sillard, P. (1999). Results and analysis of the ITRF97 / C. Boucher. *IERS Technical Note*, 27, P. 191.
7. De Mets C., Gordon, R. G., & Argus D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 181, 1–80.
8. Kreemer C., Blewitt, G., & Klein E. C. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 15(10), 3849–3889.
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. 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. Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations. *Geophysical Journal International*, 184(2), 529–540.

11. Shestakov N., Takahashi, H., Ohzono, M., Prytkov, A., Bykov, V., Gerasimenko, M., Luneva, M., Gerasimov, G., Kolomiets, A., Bormotov, V., Vasilenko, N., Baek, J., Park, P.-H., & Serov, M. (2012). Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations. *Tectonophysics*, 524–525, P. 76–86.
12. Freed A. M., Burgmann, R., Calais, E., Freymueller, J., & Hreinsdottir, S. (2006). Implications of deformation following the 2002 Denali, Alaska, earthquake for postseismic relaxation processes and lithospheric rheology. *Journal of Geophysical Research*, 111, B01401. Doi: 10.1029/2005JB003894.
13. Zhao, Q., Fu, G., Wu, W., Liu, T., Su, L., Su, X., & Shestakov, N. V. (2018). Spatial-temporal evolution and corresponding mechanism of the far-field post-seismic displacements following the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake. *Geophysical Journal International*, 214(3), 1774–1782.
14. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (1994). *GPS. Theory and Practice*. Wien, New York: Springer-Verlag, P. 355.
15. Goldin, S. V., Timofeev, V. Y., & Ardyukov, D. G. (2005). Fields of the earth's surface displacement in the Chuya earthquake zone in Gornyi Altai. *Doklady Earth Sciences*, 405A(9), 1408–1413.
16. Timofeev, V., Kulinich, R., Valitov, M., Stus, Y., Kalish, E., Ducarme, B., Gornov, P., Ardyukov, D., Sizikov, I., Timofeev, A., Gil'manova, G., Kolpashikova, T., & Proshkina, Z. (2013). Coseismic effects of the 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake measured at Far East Russia continental coast by gravity and GPS methods. *International Journal of Geosciences*, 4, 362–370. Doi: 10.4236/ijg.2012.
17. Herring, T. A., King, R.W., & McClusky, S. C. (28 September 2006). GAMIT Reference Manual. GPS analysis in MIT. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. Release 10.3.
18. Herring, T. A., King, R.W., & McClusky, S. C. (28 September 2006). 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.
19. SOPAC – Scripps Orbit and Permanent Array Center. (n. d.). Retrieved from <http://sopac-csrc.ucsd.edu/index.php/sopac/>.
20. 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.
21. Simon, M., Minson, S. E., Sladen, A., Ortega, F., Jiang, J., Owen, S. E., Meng, L., Ampaero, J.-P., Wei, S., Chu, R., Helcuberger, D. V., Ranamori, H., Hetland, E., Moore, A.W., & Webb, F. H. (2011). The 2011 Magnitude 9.0 Tohoku-Oki Earthquake: Mosaicking the Megathrust from Seconds to Centuries. *Science*, 332(6036), 1421–1425.
22. Arnautov, G. P., Kalish, E. N., Smirnov, M. G., Stus', Yu. F., & Tarasyuk, V. G. (1994). Laser ballistic gravimeter GABL-M and gravity observation results. *Avtometriya*, 3, 3–11.
23. Arnautov, G. P. (2005). Results of international metrological comparison of absolute laser ballistic gravimeters. *Avtometriya*, 41(1), 126–136.
24. Timofeev, V. Y., Kalish, E. N., Stus, Y. F., Ardyukov, D. G., Valitov, M. G., Timofeev, A. V., Nosov, D. A., Sizikov, I. S., Boiko, E. V., Gornov, P. Y., Kulinich, R. G., Kolpashchikova, T. N., Proshkina, Z. N., Nazarov, E. O., & Kolmogorov V. G. (2018). Gravity and Displacement Variations in the Areas of Strong Earthquakes in the East of Russia. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54(3), 430–443.

Received 04.02.2020

© V. Ju. Timofeev, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev, E. V. Boyko,
M. G. Valitov, Y. F. Stus, I. S. Sizikov, D. A. Nosov, E. N. Kalish, 2020