

## Об определении малых «мгновенных» вертикальных смещений земной поверхности ГНСС-методами

Н. В. Шестаков<sup>1,2</sup>, Д. В. Сысоев<sup>1,2</sup>, М. Д. Герасименко<sup>1,2</sup>, Н. Н. Титков<sup>3</sup>,  
А. Л. Верхотуров<sup>4</sup>, Н. А. Гагарский<sup>2</sup>, А. К. Кишкина<sup>2</sup>, М. Годзе<sup>5</sup>, Х. Такахаша<sup>6</sup>

<sup>1</sup> *Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия  
E-mail: shestakov.nv@dyfu.ru*

<sup>2</sup> *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950, Россия  
E-mail: dmitrij-sysoev@yandex.ru*

<sup>3</sup> *Камчатский филиал Единой геофизической службы РАН  
Петропавловск-Камчатский, 683023, Россия  
E-mail: nik@emsd.ru*

<sup>4</sup> *Вычислительный центр ДВО РАН, Хабаровск, 680000, Россия  
E-mail: andrey@ccfebras.ru*

<sup>5</sup> *Институт прогноза землетрясений, Сейсмологическое бюро Китая  
Пекин, 100036, Китайская Народная Республика  
E-mail: mgj@cea-ies.ac.cn*

<sup>6</sup> *Институт сейсмологии и вулканологии, Хоккайдский университет  
Саппоро, 0600810, Япония  
E-mail: hiroaki@sci.hokudai.ac.jp*

Математическое моделирование многих природных и техногенных процессов базируется на данных о перемещениях земной поверхности. Для их получения широко используются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС. Особый интерес представляют «мгновенные», реализующиеся за короткий временной интервал (секунды – минуты), вертикальные движения земной поверхности. В статье на основе натурального эксперимента с подвижной ГНСС-антенной исследован вопрос о возможностях регистрации, точности и надёжности определения малых мгновенных перемещений, величины которых изменяются от 6,4 до 32 мм, при помощи наиболее часто используемых для прецизионной обработки ГНСС-измерений программных пакетов (ПП) BERNESE, GAMIT/GLOBK, GIPSY-OASIS и стандартных методик обработки геодинамических ГНСС-данных. Показано, что перемещения во всём исследуемом диапазоне уверенно фиксируются по результатам обработки данных статических суточных GPS- и GPS/ГЛОНАСС-измерений в ПП BERNESE и GAMIT/GLOBK. Программный пакет GIPSY-OASIS не рекомендуется использовать для определения субсантиметровых перемещений в силу большой дисперсии и сравнительно низкой точности получаемых координатных решений. Совместная обработка сигналов GPS и ГЛОНАСС даёт небольшое повышение точности определения смещений. Формальные среднеквадратические ошибки смещений, вычисленные на основе ошибок координат, рассчитываемых программами-обработчиками ГНСС-данных, в ряде случаев не соответствуют реальной точности определения перемещений и нуждаются в корректировке.

**Ключевые слова:** ГЛОНАСС/GPS-измерения, вертикальные «мгновенные» смещения, эксперимент с подвижной ГНСС-антенной, точность определения перемещений, статистическое тестирование

Одобрена к печати: 11.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-33-44

### Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) GPS и ГЛОНАСС широко используются для исследования современных движений и деформаций земной поверхности. Особый интерес представляют «мгновенные» движения, реализующиеся за короткий временной интервал продолжительностью от нескольких секунд до нескольких минут, порождаемые различными природными и техногенными процессами и явлениями: сильными

землетрясениями (косейсмические смещения), вулканической активностью, оползнями и т.п. Именно такие смещения рассматриваются в настоящей работе. Они являются исходными данными для математического моделирования разнообразных геофизических процессов. Очевидно, что результаты моделирования напрямую зависят от точности и надёжности определения смещений, особенно если их величины малы и сопоставимы с ошибками получения. Перемещения земной поверхности могут быть определены ГНСС-методами только в дискретных точках — геодезических пунктах, на которых организованы периодические повторные или непрерывные спутниковые наблюдения. Для достижения максимальной точности определения мгновенных движений их обычно вычисляют как разности усреднённых на суточном интервале координат пунктов, получаемых при неизменном положении антенны спутникового приёмника (статический режим ГНСС-наблюдений).

В силу особенностей функционирования ГНСС точность определения вертикальной компоненты пространственных положений и перемещений геодезических пунктов ГНСС-методами в 2–3 раза ниже точности получения горизонтальных компонент (Hofmann-Wellenhof et al., 2008), что вынуждает исследователей во многих случаях ограничиваться анализом только плановых перемещений земной поверхности. Использование для моделирования вертикальных смещений повышает точность и надёжность построения геофизической модели, а в ряде случаев определяет её выбор.

В настоящей работе по данным статических ГНСС-наблюдений исследуется вопрос возможности регистрации, точности и надёжности определения малых (от субсантиметра до первых сантиметров) вертикальных мгновенных смещений земной поверхности при помощи программных пакетов (ПП) BERNESE, GAMIT/GLOBK и GIPSY-OASIS, наиболее часто используемых для обработки геодинамических ГНСС-измерений и расчёта координат геодезических пунктов. Актуальность работы обусловлена тем, что вышеуказанные ПП и используемые в них методики обработки ГНСС-измерений претерпели значительные изменения и усовершенствования. Известные нам отечественные и зарубежные публикации по данной тематике либо устарели (Betti et al., 1999), либо нацелены на решение других задач, например на оценку точности ГНСС-позиционирования в ходе мониторинга стабильности инженерных объектов (Фялковский, 2015) или локального геодинамического мониторинга (Кафтан и др., 2017), получение характеристик сейсмических колебаний (Elósegui et al., 2006), усовершенствование методов оценки скоростей перемещений земной поверхности по данным многолетних рядов ГНСС-наблюдений (Blewitt et al., 2016; Gazeaux et al., 2013; Kleinherenbrink et al., 2018).

## Методика эксперимента

Для решения сформулированной выше задачи может быть использован метод анализа ГНСС-измерений, записанных в течение некоторого временного интервала и не содержащих реальных смещений спутниковой антенны, а также метод использования эталонных перемещений ГНСС-антенны. В первом случае антенна устанавливается неподвижно и любые её «перемещения», полученные в результате обработки спутниковых измерений, считаются абсолютными ошибками определения её пространственного положения и используются для построения модели «шума» ГНСС-позиционирования, определяющего минимальную величину детектируемых смещений (Пупатенко, Шестаков, 2017). Этот метод прост в реализации, однако не позволяет исследовать точностные характеристики реальных перемещений, которые, строго говоря, могут отличаться от полученных для фиксированного положения ГНСС-антенны. Поэтому в данной работе в качестве эталона используются реальные вертикальные перемещения спутниковой антенны известной величины, реализованные при помощи изготовленной авторами установки (рис. 1). ГНСС-антенна жёстко зафиксирована на площадке, закреплённой в верхней части металлического штока с калиброванной прецизионной резьбой, который перемещается в вертикальной плоскости путём его вращения в специальной муфте.

Рис. 1. Экспериментальная установка для реализации и регистрации вертикальных перемещений ГНСС-антенны заданной величины

Один полный оборот штока соответствует смещению площадки с антенной на величину  $6,4 \pm 0,2$  мм. Вертикальность штока в процессе измерений контролировалась при помощи круглого уровня трегера, в котором была установлена ГНСС-антенна. Работы производились на крыше лабораторного корпуса Дальневосточного федерального университета (ДФУ) на о. Русский, Владивосток.

На установке в течение 35 сут с 22 марта по 25 апреля 2017 г. выполнялись непрерывные GPS/ГЛОНАСС-измерения с использованием комплекта двухчастотного спутникового приёмника Trimble NetR8 с антенной Trimble Zephyr Geodetic Model 2. Информация записывалась в суточные файлы, начало которых отнесено к 00:00:00 системного времени GPS с шагом дискретизации 30 с и углом отсечки  $5^\circ$  по углу места. Принятые параметры записи являются стандартными для обработки данных геодинамических ГНСС-наблюдений, выполняемых в статическом режиме. Через каждые 5–6 сут непрерывных наблюдений при неизменном положении ГНСС-антенны в 00:00 всемирного времени антенна поднималась на 6,4 мм. Каждый эпизод перемещения занимал менее 10 с. Выбор промежутка между последовательными перемещениями антенны определялся особенностями методов их вычисления (см. разд. «Расчёт смещений ГНСС-антенны»). Фактическое изменение вертикального положения антенны показано на рис. 3 красной ступенчатой линией. Величины одинаковых последовательных (6,4 мм) и суммарных эталонных смещений ГНСС-антенны относительно её первоначального положения, равные 6,4; 12,8; 19,2; 25,6 и 32 мм соответственно, приведены во втором столбце таблицы. Полученные в результате программной обработки одного и того же набора ГНСС-наблюдений разными программными пакетами усреднённые на суточном интервале положения тестовой антенны показаны на рис. 3 (чёрные кружки).



### Программная обработка ГНСС-измерений

Обработка всех полученных в ходе эксперимента GPS/ГЛОНАСС-наблюдений выполнена при помощи следующих программных пакетов, широко используемых для прецизионной обработки ГНСС-данных: BERNESE Version 5.2 (Bernese..., 2015); GAMIT/GLOBK Release 10.7 (Herring et al., 2018); GIPSY-OASIS Version 5, сервис APPS (Gregorius, 1996).

Первые два ПП реализуют относительный метод позиционирования (вычисляют разности координат исходных и определяемого пунктов ГНСС-наблюдений), а работа комплекса GIPSY-OASIS базируется на технологии высокоточного точечного позиционирования (независимое определение координат отдельных станций, Precise Point Positioning — PPP) (Zumberge et al., 1997). Для обработки измерений использовались: точные эфемериды спутников GPS и ГЛОНАСС, параметры вращения Земли и другие величины, регулярно определяемые аналитическими центрами IGS, CODE, SOPAC, JPL; глобальная модель ионосферы, океанических (FES2004) и атмосферных приливов (Ray, Ponte, 2003). Неоднозначности фазовых измерений разрешались как целые числа для первых двух ПП и оценивались как вещественные числа в GIPSY-OASIS. Влияние ионосферы минимизировалось комбинированием наблюдений на двух частотах, тропосферы — кусочно-непрерывным моделированием с использованием моделей тропосферы GMF (Böhm et al., 2006), VMF (<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/GRID/VMFG/>) и независимым определением параметров влажной тропосферной задержки для каждого фрагмента по данным ГНСС-наблюдений. Для каждого

суточного сеанса спутниковых наблюдений вычислялись пространственные прямоугольные координаты  $(X, Y, Z)^T$  подвижной антенны в системе координат ITRF2014 (Altamimi et al., 2016) путём совместной обработки ГНСС-наблюдений, полученных на экспериментальной установке и опорных пунктах — станциях мировой ГНСС-сети IGS (YSSK, PETS, TSKB, MCIL, BJFS, IRKM, IRKJ, TIXI, CHUM, ARTU), имеющих длительную историю спутниковых наблюдений и субмиллиметровые среднеквадратические ошибки координат и среднегодовых скоростей их изменения (рис. 2). Координаты опорных пунктов экстраполированы на середину интервала наблюдений в силу незначительности их изменений в течение эксперимента. Система координат реализована наложением жёстких ограничений (до 1 мм) на изменения пространственных положений опорных пунктов (Bernese..., 2015). Фиксация системы координат ITRF2014 в GIPSY-OASIS осуществлялась используемыми параметрами вращения Земли и эфемеридами навигационных спутников. Для удобства визуализации и дальнейших вычислений ряды координат  $(X, Y, Z)^T$  трансформировались в локальную топоцентрическую систему координат с осями, параллельными направлениям север — юг, восток — запад, зенит — надир (Hofmann-Wellenhof et al., 2008). Начало ряда для каждой координатной компоненты приводилось к его значению, полученному в первую эпоху (момент) наблюдений.

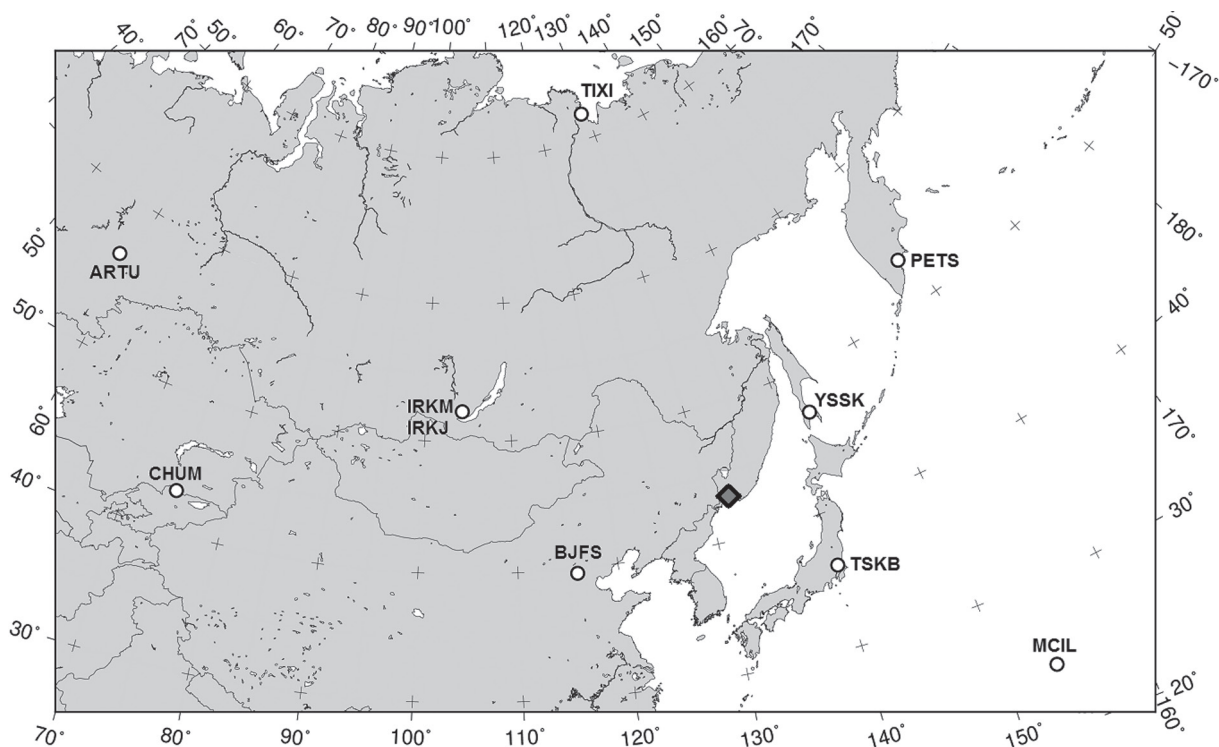


Рис. 2. Схема расположения опорных ГНСС-пунктов. Ромбом отмечено местоположение определяемого (экспериментального) пункта наблюдений

### Расчёт смещений ГНСС-антенны

Смещение геодезического пункта по какой-либо координатной компоненте в локальной системе координат, отражающее движения земной поверхности и точность его определения, характеризуемую среднеквадратической ошибкой (СКО), получают при помощи выражений:

$$dU = U_2 - U_1, \quad m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2},$$

где  $U_1$ ,  $U_2$  и  $m_1$ ,  $m_2$  — независимо определённые положения (координаты) ГНСС-пункта и их СКО до и после перемещения соответственно. Для более точного и надёжного оценивания этих величин используют не отдельные значения, а ряды координат, накопленные, как правило,

за промежутки от 3 до 7–10 сут до и после перемещения. Большая продолжительность ряда анализируемых наблюдений снижает оперативность получения мгновенных перемещений, требует учёта сезонных влияний и среднегодовых скоростей движения пункта, которые далеко не всегда известны с достаточной точностью. В настоящем эксперименте промежуток между последовательными перемещениями тестовой антенны составлял 5–6 сут.

Для расчёта значений  $U_1$ ,  $U_2$  и их СКО часто используется метод отдельной аппроксимации координатных рядов до и после перемещения линейной регрессией вида:  $u_i = at_i + b$ , где  $a$  и  $b$  — определяемые методом наименьших квадратов коэффициенты,  $t_i$  — эпохи наблюдений. СКО оценок  $U_1$  и  $U_2$  находятся с использованием ковариационных матриц  $K_{a,b}$ , вычисляемых из уравнивания координатных рядов до и после перемещения ГНСС-антенны с учётом СКО оценок координат, получаемых в результате программной обработки ГНСС-наблюдений (Steblov et al., 2008; Wdowinski et al., 1997).

Для оценивания  $U_1$  и  $U_2$  также используются (см., например, (Steblov et al., 2014; Wdowinski et al., 1997)): медиана, среднее арифметическое и средневзвешенное значение координатного ряда до и после смещения с соответствующей оценкой точности, выполняемой по общеизвестной методике (см., например, (Большаков, Гайдаев, 1977)). В данной работе смещения тестовой ГНСС-антенны вычислялись всеми четырьмя вышеуказанными способами и сравнивались с эталонными значениями с целью выявления метода, дающего наименьшие отклонения (невязки) от истинных величин подвижек.

Для решения вопроса о возможности или невозможности регистрации полученных изменений положения спутниковой антенны вычисленные смещения статистически тестировались с уровнем значимости  $\alpha = 0,05$  при помощи критерия  $dU^2/m^2 = F_0 < F_{1,r_1+r_2}$ , где  $r_1, r_2$  — число степеней свободы (количество измерений минус число определяемых параметров) при уравнивании координатных рядов до и после подвижки соответственно. Если  $F_0 > F_{1,r_1+r_2}$ , смещения считались зарегистрированными (значимыми). Соответствующие величины  $F_{1,r_1+r_2}$  по заданным  $\alpha$  и  $r_1, r_2$  выбирались из таблиц распределения Фишера.

## Результаты эксперимента и их обсуждение

На *рис. 3* (см. с. 38) показаны эталонные и полученные по данным обработки ГНСС-наблюдений изменения вертикального положения тестовой антенны, а в *таблице* приведены оценки её смещений, определённые методами, описанными в предыдущем разделе, вместе с их формальными СКО, рассчитанными на основе СКО координат, полученных из программной обработки ГНСС-наблюдений с использованием только сигналов GPS (см. *рис. 3а, в, г*) и GPS/ГЛОНАСС (см. *рис. 3б*).

На *рис. 3* видно, что отдельные мгновенные и накопленные изменения положения ГНСС-антенны в ходе эксперимента фиксируются в результатах обработки спутниковых наблюдений всеми ПП. Обработка данных в относительном режиме позиционирования позволяет уверенно визуально фиксировать даже субсантиметровые смещения, в то время как метод PPP (GIPSY-OASYS), характеризующийся существенно большей дисперсией получаемых координатных решений, позволяет выявить только общую тенденцию и направление перемещения антенны.

Из анализа *таблицы* следует, что наилучшие результаты определения смещений тестовой антенны достигаются использованием арифметического или весового среднего координатных рядов до и после перемещения. В этом случае практически все разности вычисленных и эталонных значений перемещений антенны (невязки) субсантиметровых (6,4 мм) и накопленных смещений сантиметрового диапазона, полученные при помощи ПП BERNESI и GAMIT/GLOBK, не превосходят по абсолютной величине 1,5–2,5 мм, а соответствующие им оценки перемещений получаются с 99%-й доверительной вероятностью. Вычисление медианы даёт близкие с точки зрения совпадения полученные оценки с эталоном результаты, но определение, является ли перемещением полученное субсантиметровое изменение координат, возможно далеко не всегда, поскольку СКО медианы существенно больше ошибки арифметического или весового среднего.

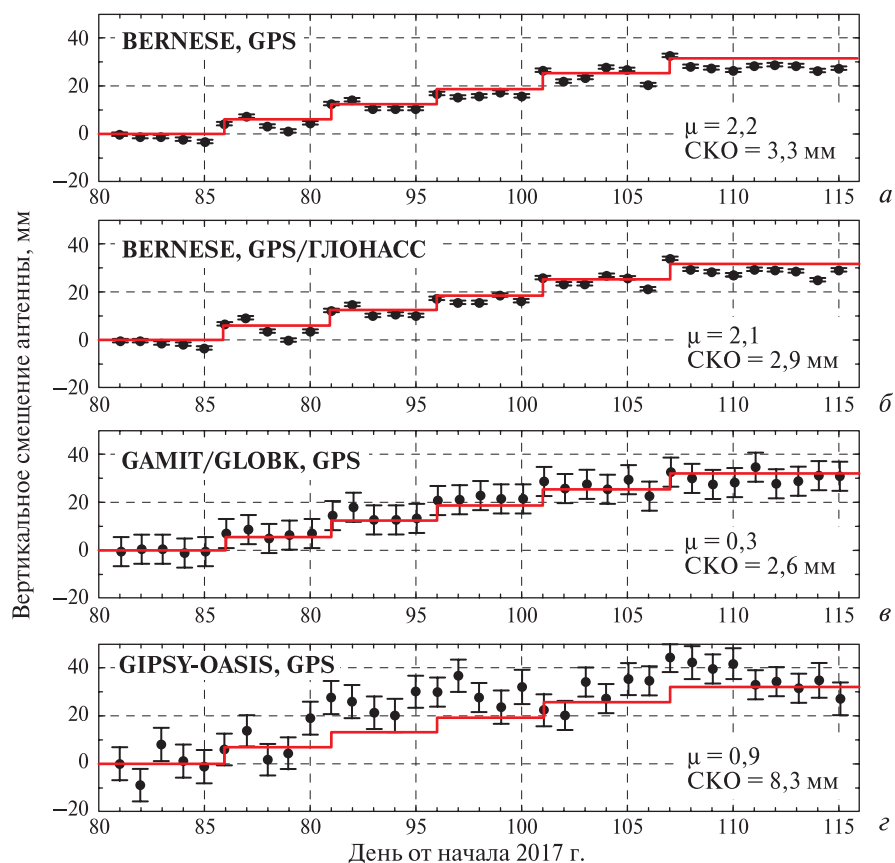


Рис. 3. Временные серии изменения вертикального положения подвижной ГНСС-антенны, полученные в результате обработки данных спутниковых наблюдений ПП BERNESE (а и б), GAMIT/GLOBK (в), GIPSY-OASIS (г). На рис. 3б показаны результаты обработки данных по сигналам GPS и ГЛОНАСС, на остальных — только по сигналам GPS. В правом нижнем углу даны оценки ошибки единицы веса  $\mu$  и ошибок смещений, вычисленные по невязкам условных уравнений (см. разд. «Результаты эксперимента и их обсуждение»). Планками показаны формальные SKO координат, полученные из программной обработки ГНСС-измерений вышеуказанными ПП. Фактическое изменение вертикального положения антенны обозначено красной ступенчатой линией

Метод линейной аппроксимации часто приводит к значительным ошибкам оцениваемых смещений (см. таблицу), так как весьма чувствителен к любым «колебаниям» координатных решений, особенно при малом количестве членов ряда, как это обычно бывает при практических вычислениях, и поэтому может быть рекомендован для оценки мгновенных субсантиметровых смещений при малой дисперсии (разбросе) отдельных координатных решений (таблица в) и/или наличии выраженного разнохарактерного тренда в координатных рядах до и после перемещения.

Точность и надёжность определения мгновенных субсантиметровых и даже накопленных сантиметровых смещений при помощи ПП GIPSY-OASIS, реализующего метод PPP, следует признать неудовлетворительными в силу большой величины SKO оценок координат и большой дисперсии получаемых координатных рядов (таблица г).

Из рис. 3 и таблиц а и б видно, что совместная обработка сигналов GPS и ГЛОНАСС приводит к небольшому уменьшению формальных SKO среднесуточных вертикальных положений спутниковой антенны и невязок вычисленных смещений, что говорит о целесообразности такой обработки при решении геодинамических задач. Также необходимо отметить, что использование в процессе обработки ГНСС-данных проектирующей функции VMF вместо ранее применявшейся в большинстве ПП функции GMF (см. разд. «Программная обработка ГНСС-измерений») заметно улучшает результаты оценивания мгновенных вертикальных перемещений.

Оценки и СКО мгновенных и накопленных смещений подвижной антенны, вычисленные с использованием медианы, среднего арифметического, среднего весового и линейной регрессии для аппроксимации 5–6-суточных рядов координат до и после каждого смещения (столбцы 3–6) и их эталонные значения (столбец 2). Вычисления выполнены программными пакетами: *a* — BERNESE (GPS); *b* — BERNESE (GPS/ГЛОНАСС); *в* — GAMIT/GLOBK (GPS); *г* — GIPSY-OASYS (GPS). Серая заливка означает, что соответствующее перемещение статистически незначимо (не может быть зарегистрировано)

№ смещения	Эталонные смещения, мм	Вычисленные смещения, мм			
		Медиана	Среднее арифметическое	Среднее весовое	Линейная регрессия
1	2	3	4	5	6
<b><i>a</i> ПП BERNESE (GPS)</b>					
<i>Мгновенные смещения</i>					
1	6,4	5,8±1,4	5,8±0,6	5,8±0,6	8,9±1,9
2	6,4	6,3±1,5	7,5±0,7	7,6±0,7	10,7±2,6
3	6,4	5,5±1,5	4,7±0,7	4,6±0,7	7,0±1,7
4	6,4	8,8±1,5	8,1±0,7	8,1±0,6	8,7±2,6
5	6,4	3,1±1,5	3,7±0,6	3,7±0,6	6,2±3,2
<i>Накопленные смещения</i>					
1	6,4	5,8±1,4	5,8±0,6	5,8±0,6	8,9±1,9
2	12,8	12,1±1,5	13,3±0,7	13,4±0,7	17,2±1,2
3	19,2	17,5±1,5	17,9±0,7	17,9±0,7	19,9±1,0
4	25,6	26,3±1,5	26,0±0,6	26,0±0,6	29,1±2,4
5	32,0	29,4±1,5	29,7±0,6	29,7±0,6	33,1±1,2
<b><i>b</i> ПП BERNESE (GPS/ГЛОНАСС)</b>					
<i>Мгновенные смещения</i>					
1	6,4	5,4±1,3	6,1±0,6	6,1±0,6	10,9±2,4
2	6,4	6,8±1,3	7,2±0,6	7,2±0,6	12,7±3,4
3	6,4	5,8±1,4	4,8±0,6	4,7±0,6	6,4±2,1
4	6,4	7,7±1,4	7,6±0,6	7,6±0,6	8,0±2,0
5	6,4	4,1±1,4	4,3±0,5	4,3±0,6	7,7±2,2
<i>Накопленные смещения</i>					
1	6,4	5,4±1,3	6,1±0,6	6,1±0,6	10,9±2,4
2	12,8	12,2±1,3	13,3±0,6	13,3±0,6	16,8±1,4
3	19,2	18,0±1,3	18,0±0,6	18,0±0,6	19,6±1,2
4	25,6	25,7±1,3	25,6±0,6	25,6±0,6	28,8±1,5
5	32,0	29,8±1,3	29,9±0,5	29,9±0,5	33,8±1,3
<b><i>в</i> ПП GAMIT/GLOBK (GPS)</b>					
<i>Мгновенные смещения</i>					
1	6,4	7,1±8,4	7,0±3,8	7,0±3,8	7,6±1,3
2	6,4	6,6±8,5	7,2±3,8	7,2±3,8	8,8±2,1
3	6,4	7,9±8,7	7,2±3,9	7,2±3,9	8,8±2,2
4	6,4	5,3±8,7	5,1±3,8	5,1±3,8	6,1±1,9
5	6,4	3,2±8,7	3,5±3,4	3,5±3,4	6,0±2,8
<i>Накопленные смещения</i>					
1	6,4	7,1±8,4	7,0±3,8	7,0±3,8	7,6±1,3
2	12,8	13,7±8,6	14,2±3,8	14,2±3,8	15,8±1,7
3	19,2	21,6±8,6	21,4±3,9	21,4±3,9	21,4±1,0
4	25,6	26,8±8,6	26,5±3,7	26,5±3,7	28,5±1,8
5	32,0	30,0±8,6	30,0±3,4	30,0±3,4	30,5±1,8

№ смещения	Эталонные смещения, мм	Вычисленные смещения, мм			
		Медиана	Среднее арифметическое	Среднее весовое	Линейная регрессия
1	2	3	4	5	6
з ПП GIPSY-OASYS (GPS)					
<i>Мгновенные смещения</i>					
1	6,4	5,6±9,6	9,2±4,2	9,2±4,2	3,3±9,6
2	6,4	19,9±9,5	15,8±4,2	16,1±4,2	11,8±8,9
3	6,4	3,9±9,3	5,0±4,2	5,0±4,2	7,2±6,5
4	6,4	0,8±8,9	-1,0±3,9	-1,1±3,9	-5,9±6,7
5	6,4	4,3±9,3	7,4±3,4	7,2±3,4	5,1±4,6
<i>Накопленные смещения</i>					
1	6,4	5,6±9,6	9,2±4,2	9,2±4,2	3,3±9,6
2	12,8	25,5±9,8	25,0± 4,3	25,4±4,3	23,2±8,3
3	19,2	29,4±9,4	30,1±4,2	30,4±4,2	29,1±8,5
4	25,6	30,2±9,4	29,0±4,0	29,3±4,0	19,5±8,2
5	32,0	34,5±9,8	36,5±3,7	36,6±3,7	41,7±7,6

На рис. 3 также хорошо заметно, что формальные (априорные) СКО координатных решений, получаемые в результате обработки данных в разных ПП, существенно различаются, что связано с различиями в алгоритмах оценки точности координат, используемых в этих ПП. Как следствие, весьма разнятся основывающиеся на них оценки СКО вычисленных смещений и результаты их статистического тестирования при вполне сопоставимых отличиях от эталонных значений (см., например, таблицы а, б и в, з). Более реалистично оценить точности определения координат ГНСС-антенны, вычисленные при помощи разных ПП, и полученные на их основе СКО перемещений антенны можно, рассчитав по невязкам условий уравнений безразмерный коэффициент  $\mu$  — ошибку единицы веса отдельного измерения:

$$\theta = U_2 - U_1 - \Delta U, \quad \mu = \sqrt{[p_\theta \theta^2] / n},$$

где  $\Delta U$  — известное фактическое (эталонное) перемещение ГНСС-антенны, реализуемое при помощи экспериментальной установки;  $\theta$  — истинная ошибка (невязка) каждого перемещения антенны, вычисленного по разности координат, определённых по ГНСС-данным, до ( $U_1$ ) и после ( $U_2$ ) её перемещения. Символ [...] означает общепринятое и введённое Гауссом обозначение суммы,  $p_\theta$  и  $n$  — веса и число невязок соответственно. Веса величин  $\theta$  определяются из выражения:  $p_\theta = 1 / (m_1^2 + m_2^2)$ , где  $m_1$  и  $m_2$  — формальные СКО оценок  $U_1$  и  $U_2$ , полученные из программной обработки ГНСС-наблюдений. Реалистичные апостериорные СКО членов координатного ряда получаются умножением априорных значений СКО на коэффициент  $\mu$ . Очевидно, что при  $\mu = 1$  принятые априорные значения СКО координат соответствуют реальной точности измерений;  $\mu < 1$  говорит о завышенных, а  $\mu > 1$  — о заниженных величинах формальных ошибок положений тестовой антенны. Принимая во внимание, что полученные в результате эксперимента величины СКО членов одного и того же координатного ряда различаются незначительно (в пределах 1,3 мм), т. е. измерения практически равноточны, можно считать, что соответствующие СКО перемещений тестовой антенны, вычисленные с использованием апостериорных СКО координат, будут равны  $1,4\mu t$ , где  $t$  — среднее значение формальных СКО координатного ряда. Полученные таким образом для каждого из четырёх анализируемых координатных рядов коэффициенты  $\mu$  и апостериорные оценки СКО перемещений антенны показаны на рис. 3. Сравнивая эти величины и формальные СКО смещений из столбцов 3–6 таблицы, легко видеть, что использование для оценки точности перемещений антенны формальных СКО координат, полученных непосредственно из программной обработки ГНСС-измерений, может приводить как к значительному её завышению (ПП BERNESE,



таблицы а и б), так и к существенному её занижению (ПП GAMIT/GLOBK, таблица в, столбец 3 — способ медианы), что напрямую сказывается на результатах статистического тестирования вычисленных подвижек и должно учитываться при оценке точности мгновенных смещений земной поверхности, выполняемых при помощи вышеуказанных ПП, и способов их расчёта.

## Заключение

В результате эксперимента с подвижной ГНСС-антенной исследован вопрос о возможности регистрации, точности и надёжности определения субсантиметровых мгновенных и накопленных вертикальных смещений земной поверхности. Перемещения в диапазоне от 6,4 до 32 мм уверенно фиксируются по результатам обработки данных суточных статических GPS- и GPS/ГЛОНАСС-измерений в ПП BERNESE и GAMIT/GLOBK при помощи стандартных методик обработки геодинимических данных. GIPSY-OASIS не рекомендуется использовать для определения субсантиметровых перемещений в силу большой дисперсии и низкой точности получаемых координатных решений. Совместная обработка сигналов GPS и ГЛОНАСС даёт небольшое повышение точности определения смещений. Формальные СКО смещений, вычисленные на основе ошибок координат, рассчитываемых программами-обработчиками ГНСС-данных, в ряде случаев не соответствуют реальной точности определения перемещений и должны корректироваться, например, с помощью предложенного выше расчёта ошибки единицы веса  $\mu$  отдельного измерения по невязкам условных уравнений, хотя, по-нашему мнению, этот вопрос требует дополнительного исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-55-53110а), гранта ДВО РАН № 18-5-024 и Института прикладной математики ДВО РАН. При обработке данных использовались ресурсы Центра коллективного пользования «Центр данных ДВО РАН» (Sorokin et al., 2017). Авторы благодарят Н. Н. Ковригу за помощь в редактировании текста на английском языке.

## Литература

1. *Большаков В. Д., Гайдаев П. А.* Теория математической обработки геодезических измерений. 2-е изд. М.: Недра. 1977. 367 с.
2. *Кафтан В. И., Сидоров В. А., Устинов А. В.* Сравнительный анализ точности локального мониторинга движений и деформаций земной поверхности с использованием глобальных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС // *Вулканология и сейсмология*. 2017. № 3. С. 50–58.
3. *Пупатенко В. В., Шестаков Н. В.* Моделирование шума в рядах высокочастотных ГНСС-координат, получаемых в режиме реального времени // *Успехи современного естествознания*. 2017. № 2. С. 140–144.
4. *Фялковский А. Л.* Разработка и исследование технологических решений повышения качества геодезического мониторинга динамических объектов с использованием ГНСС: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 152 с.
5. *Altamimi Z., Rebischung P., Metivier L., Collilieux X.* ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2016. V. 121. P. 6109–6131.
6. *Bernese GPS Software Version 5.2 / eds. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P.* Bern: AIUB, 2015. 612 p. URL: <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf>.
7. *Betti B., Biagi L., Crespi M., Riguzzi F.* GPS sensitivity analysis applied to non-permanent deformation control networks // *J. Geodesy*. 1999. V. 73. P. 158–167.
8. *Blewitt G., Kreemer C., Hammond W. C., Gazeaux J.* MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2016. V. 121. P. 2054–2068.
9. *Böhm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H.* Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. P. L07304–07308.

10. *Elósegui P., Davis J. L., Oberlander D., Baena R., Ekström G.* Accuracy of high-rate GPS for seismology // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. P. L11308–11312.
11. *Gazeaux J., Williams S., King M., Bos M., Dach R., Deo M., Moore A. W., Ostini L., Petrie E., Roggero M., Teferle F. N., Olivares G., Webb F. H.* Detecting offsets in GPS time series: first results from the detection of offsets in GPS experiment // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 2013. V. 118. P. 2397–2407.
12. *Gregorius T.* GIPSY-OASIS II. How it works... Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne, USA. 1996. 150 p.
13. *Herring T. A., King R. W., Floyd M. A., McClusky S. C.* Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.7. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2018. 54 p. URL: [http://geoweb.mit.edu/gg/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf).
14. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E.* GNSS — Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, GALILEO and more. Wien: Springer Science and Business Media, 2008. 518 p.
15. *Kleinherenbrink M., Riva R., Frederikse T.* A comparison of methods to estimate vertical land motion trends from GNSS and altimetry at tide gauge stations // *Ocean Science*. 2018. V. 14. P. 187–204.
16. *Ray R. D., Ponte R. M.* Barometric tides from ECMWF operational analyses // *Annales Geophysicae*. 2003. V. 21. Iss. 8. P. 1897–1910.
17. *Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P.* The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia // *Scientific and Technical Information Processing*. 2017. V. 4. P. 302–304.
18. *Steblov G. M., Kogan M. G., Levin B. V., Vasilenko N. F., Prytkov A. S., Frolov D. I.* Spatially linked asperities of the 2006–2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS // *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35. P. L22306–22311.
19. *Steblov G. M., Ekström G., Kogan M. G., Freymueller J. T., Titkov N. N., Vasilenko N. F., Nettles M., Gabsaturov Yu. V., Prytkov A. S., Frolov D. I., Kondratyev M. N.* First geodetic observations of a deep earthquake: The 2013 Sea of Okhotsk Mw 8.3, 611 km-deep event // *Geophysical Research Letters*. 2014. V. 41. P. 3826–3832.
20. *Wdowinski S., Bock Y., Zhang J., Fang P., Genrich J.* Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102. No. B8. P. 18057–18070.
21. *Zumberge J. F., Hefflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H.* Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102(B3). P. 5005–5017.

## On determination of the Earth's surface small "instant" vertical displacements by GNSS-techniques

N. V. Shestakov<sup>1,2</sup>, D. V. Sysoev<sup>1,2</sup>, M. D. Gerasimenko<sup>1,2</sup>, N. N. Titkov<sup>3</sup>,  
A. L. Verkhoturov<sup>4</sup>, N. A. Gagarskii<sup>2</sup>, A. K. Kishkina<sup>2</sup>, M. Guojie<sup>5</sup>, H. Takahashi<sup>6</sup>

<sup>1</sup> *Institute for Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*  
E-mail: shestakov.nv@dvfu.ru

<sup>2</sup> *Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia*  
E-mail: dmitrij-sysoev@yandex.ru

<sup>3</sup> *Kamchatka Branch of Geophysical Survey RAS*  
*Petropavlovsk-Kamchatsky 683023, Russia*  
E-mail: nik@emsd.ru

<sup>4</sup> *Computing Center FEB RAS, Khabarovsk 680000, Russia*  
E-mail: andrey@ccfebras.ru

<sup>5</sup> *Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration*  
*Beijing 100036, China*  
E-mail: mgj@cea-ies.ac.cn

<sup>6</sup> *Institute of Seismology and Volcanology, Hokkaido University*  
*Sapporo 0600810, Japan*  
E-mail: hiroaki@sci.hokudai.ac.jp

Mathematical modeling of various natural and man-made processes is based on the Earth's surface displacement data, to obtain which the Global Positioning Systems GPS and GLONASS are widely used. The "instant" vertical surface displacements occurred at short time intervals (from seconds to minutes) are the subject of special interest. Based on the experiment using the moving GNSS antenna, the paper investigates the problem of detection ability, accuracy and reliability of determination of small "instant" displacements ranging from 6.4 to 32 mm by the high-precision and most frequently used software packages BERNESE, GAMIT/GLOBK and GIPSY-OASIS and standard geodynamic GNSS data processing techniques. It is shown that all antenna shifts associated with the investigated displacement range could be confidently resolved from the results of daily static GPS/GLONASS data processing performed by the BERNESE and GAMIT/GLOBK packages. The GIPSY-OASIS software is not recommended for the determination of subcentimeter level displacements due to high dispersion and relatively low precision of the obtained coordinate solutions. Joint processing of GPS and GLONASS signals slightly improves the precision determination of displacements. The formal root-mean-square errors of the Earth's surface displacements calculated based on coordinate errors resulting from the GNSS data processing are not realistic in some cases and need further rescaling.

**Keywords:** GLONASS/GPS-measurements, "instant" vertical displacements, experiment using the moving GNSS-antenna, accuracy of displacement determination, hypothesis testing

Accepted: 11.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-33-44

## References

1. Bolshakov V. D., Gaidarov P. A., *Teoriya matematicheskoi obrabotki geodezicheskikh izmerenii* (Theory of mathematical processing of geodetic measurements), Moscow: Nedra, 1977, 367 p.
2. Kaftan V. I., Sidorov V. A., Ustinov A. V., Sravnitel'nyi analiz tochnosti lokal'nogo monitoringa dvizhenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti s ispol'zovaniem global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem GPS i GLONASS (A comparative analysis of the accuracy attainable for the local monitoring of Earth's surface movements and deformation using the GPS and GLONASS navigation satellite systems), *Vulkanologiya i seismologiya*, 2017, No. 3, pp. 50–58.
3. Pupatenko V. V., Shestakov N. V., Modelirovanie shuma v ryadakh visokochastotnykh GNSS-koordinat, poluchaemykh v rezhime real'nogo vremeni (Noise modeling of high-frequency real-time coordinate time series), *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2017, No. 2, pp. 140–144.

4. Fyalkovskii A. L., *Razrabotka i issledovanie tekhnologicheskikh reshenii povysheniya kachestva geodezicheskogo monitoringa dinamicheskikh ob'ektov s ispolzovaniem GNSS: Diss. kand. tekhn. nauk* (Development and investigation of technological solutions for quality improvement of dynamic objects geodetic monitoring by GNSS-techniques, Cand. tech. sci. thesis), Moscow, 2015, 152 p.
5. Altamimi Z., Rebischung P., Metivier L., Collilieux X., ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, Vol. 121, pp. 6109–6131.
6. *Bernese GPS Software Version 5.2.*, Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (eds.), Bern: AIUB, 2015, 612 p., available at: <http://www.bernese.unibe.ch/docs/DOCU52.pdf>.
7. Betti B., Biagi L., Crespi M., Riguzzi F., GPS sensitivity analysis applied to non-permanent deformation control networks, *J. Geodesy*, 1999, Vol. 73, pp. 158–167.
8. Blewitt G., Kreemer C., Hammond W. C., Gazeaux J., MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, Vol. 121, pp. 2054–2068.
9. Böhm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H., Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, pp. L07304–07308.
10. Elósegui P., Davis J. L., Oberlander D., Baena R., Ekström G., Accuracy of high-rate GPS for seismology, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, pp. L11308–11312.
11. Gazeaux J., Williams S., King M., Bos M., Dach R., Deo M., Moore A. W., Ostini L., Petrie E., Roggero M., Teferle F. N., Olivares G., Webb F. H., Detecting offsets in GPS time series: first results from the detection of offsets in GPS experiment, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, Vol. 118, pp. 2397–2407.
12. Gregorius T., *GIPSY-OASIS II. How it works...* Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne, USA, 1996, 150 p.
13. Herring T. A., King R. W., Floyd M. A., McClusky S. C., *Introduction to GAMIT/GLOBK Release 10.7.*, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, USA, 2018, 54 p., available at: URL: [http://geoweb.mit.edu/gg/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/Intro_GG.pdf).
14. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Walse E., *GNSS — Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, GALILEO and more*, Wien: Springer Science & Business Media, 2008, 518 p.
15. Kleinherenbrink M., Riva R., Frederikse T., A comparison of methods to estimate vertical land motion trends from GNSS and altimetry at tide gauge stations, *Ocean Science*, 2018, Vol. 14, pp. 187–204.
16. Ray R. D., Ponte R. M., Barometric tides from ECMWF operational analyses, *Annales Geophysicae*, 2003, Vol. 21, Issue 8, pp. 1897–1910.
17. Sorokin A. A., Makogonov S. I., Korolev S. P., The Information Infrastructure for Collective Scientific Work in the Far East of Russia, *Scientific and Technical Information Processing*, 2017, Vol. 4, pp. 302–304.
18. Steblov G. M., Kogan M. G., Levin B. V., Vasilenko N. F., Prytkov A. S., Frolov D. I., Spatially linked asperities of the 2006–2007 great Kuril earthquakes revealed by GPS, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, pp. L22306–22311.
19. Steblov G. M., Ekström G., Kogan M. G., Freymueller J. T., Titkov N. N., Vasilenko N. F., Nettles M., Gabsatarov Yu. V., Prytkov A. S., Frolov D. I., Kondratyev M. N., First geodetic observations of a deep earthquake: The 2013 Sea of Okhotsk Mw 8.3, 611 km-deep event, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, pp. 3826–3832.
20. Wdowinski S., Bock Y., Zhang J., Fang P., Genrich J., Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102, No. B8, pp. 18057–18070.
21. Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., Watkins M. M., Webb F. H., Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophysical Research*, 1997, Vol. 102(B3), pp. 5005–5017.