

Сопоставление данных ГЛОНАСС и GPS измерений способом дифференциального позиционирования в режиме статика при решении геодинамических задач

О.Н. Галаганов, Т.В. Гусева, И.С. Крупенникова

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
Москва, 123995, Россия*

E-mails: galagan@ifz.ru, guseva@ifz.ru

При изучении современных движений земной коры на геодинамических полигонах с использованием глобальных навигационных спутниковых систем регистрация спутниковых сигналов ГЛОНАСС (российская система) ведется наряду с сигналами GPS (американская система). Однако в обработку до сих пор включаются в основном данные GPS, что объясняют большими ошибками определения координат при работе с системой ГЛОНАСС и несопоставимостью координат, получаемых разными системами. Представлены результаты анализа точных спутниковых измерений способом дифференциального позиционирования в статическом режиме для решения геодинамических задач. Использованы данные одновременной регистрации ГЛОНАСС и GPS двух системными двухчастотными приемниками на 34 пунктах локальной геодезической сети в 2012 г. и 2013 г. Продолжительность непрерывных измерений на пунктах составляла от 6 часов до четырех суток. Обработка выполнена по программе Bernese 5.0. Выявлена зависимость погрешности определения координат от продолжительности измерений в виде степенной функции. Эта зависимость может служить критерием при организации геодинамических исследований с применением ГНСС измерений. Погрешность определения координат по данным ГЛОНАСС превышает таковую по данным GPS на величину до 20 %. Особое внимание уделено анализу сопоставимости определяемых координат в ITRF по измерениям ГЛОНАСС и GPS. Расхождения координат по измерениям длительностью до суток составляет ± 10 мм, при неблагоприятных условиях наблюдений – до 30 мм. При увеличении продолжительности измерений на пункте различие координат, определенных разными системами, снижается и не превышает 5 мм.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, GPS, измерения, координаты, точность, продолжительность регистрации, распределение, аппроксимация, сравнение, критерий

Введение

Российская делегация на заседании комитета гражданской службы GPS в американском Портленде в сентябре 2011 г. заявила, что российская навигационная спутниковая система ГЛОНАСС по точности определения координат больше не уступает американской GPS. Точнее, уступает, но уже не в разы, а так, что сегодняшний уровень погрешностей уже не принципиален для гражданских пользователей (Деловая газета «Маркер», 2011).

Американская система позиционирования GPS (Global Positioning System) начала полнофункциональную работу с 1995 года, хотя применялась уже в 1991 г. в ходе войны в Персидском заливе. Сейчас в составе орбитальной группировки насчитывается 30 спутников. Российская навигационная система ГЛОНАСС (GLONASS) функционирует с начала 90-х годов, в ее составе насчитывается 24 спутника. Считается, что с помощью ГЛОНАСС точнее определяются координаты в полярных широтах, а GPS – в экваториальных.

Несмотря на то, что при изучении современных движений земной коры на геодинамических полигонах с использованием ГНСС (глобальные навигационные спутниковые системы) измерений, регистрация спутниковых сигналов ГЛОНАСС ведется наряду

с сигналами GPS, в обработку до сих пор включаются в основном данные GPS, что объясняют большими ошибками определения координат при работе с системой ГЛОНАСС. Какова же реальная ситуация в настоящее время? Ответ на этот вопрос содержится в выполненном исследовании.

Постановка задачи

Точность измерений, проводимых с помощью ГЛОНАСС/GPS, зависит от многих факторов, в том числе: от конструкции и класса приемника, числа и геометрии расположения спутников на небесной сфере (в реальном времени), состояния ионосферы и атмосферы Земли (облачность, влажность и т.д.), наличия помех и т.д. Важную роль в повышении точности наблюдений играют следующие условия: расстояние до ближайшей базовой станции в зоне обслуживания системы, длительность наблюдений, соответствующий контроль качества работ, уровень подготовки и практический опыт специалиста (Высокие технологии, 2014). Особенно большие требования к точности спутниковых измерений возникают при организации их мониторинга на геодинамических сетях ответственных инженерных сооружений: атомных, гидро- и гидроаккумулирующих электростанциях (АЭС, ГЭС, ГАЭС), мест захоронения промышленных отходов и т.д.

В настоящее время накоплен большой материал выполнения качественных повторных спутниковых измерений с использованием GPS+ГЛОНАСС приемников на локальных геодинамических сетях АЭС, ГАЭС. В предлагаемом исследовании ставится задача оценить реальную точность ГНСС измерений и сравнить результаты измерений GPS и ГЛОНАСС.

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбраны данные ГНСС измерений на пунктах геодезической сети, расположенной в 100 км на север от Москвы на Клинско-Дмитровской гряде Средне-Русской возвышенности. На пересеченной местности площадью $6 \times 6,5$ км² создана сеть пунктов, закрепленных в грунте и на инженерных сооружениях, с принудительным центрированием принимающих антенн. Расстояния между пунктами локальной сети составляют от нескольких десятков метров до 6,3 км, наибольшее превышение – 110 м. На территории полигона расположены инженерные сооружения с эксплуатируемой энергосистемой, а также жилые здания, что может оказывать влияния на условия наблюдений.

Прецизионные измерения методом дифференциального позиционирования в режиме статика выполняются два раза в год 10÷12 комплектами двухчастотных приемников фирмы Javad и Topcon с одновременной регистрацией сигналов GPS и ГЛОНАСС. Частота опроса

сигналов составляет 30 секунд, угол превышения спутников над горизонтом выбирался равным $\geq 10^\circ$.

Программа работ предусматривает различную длительность непрерывных наблюдений на пунктах: в течение 3–4 суток на базовых пунктах локальной сети и от суток до 6 часов на промежуточных (Гусева и др., 2011; Галаганов и др., 2013). Обработка данных выполняется программой Bernese 5.0. В блок анализа данных включены геоцентрические координаты (X, Y, Z) в ITRF2008 и геодезические координаты (широта, долгота и высота), полученные по данным ноябрьских циклов измерений 2012 г. и 2013 г. на 34 пунктах. Осенний цикл измерений 2012 г. характеризовался температурой воздуха $\pm 2^\circ\text{C}$, сплошной облачностью, дождями со снегом или ледяной крупой, умеренным ветром и большой влажностью. Погодные условия 2013 г. характеризовались сплошной облачностью при непродолжительных дождях с температурным режимом $4\div 10^\circ\text{C}$ и ветром до 8 м/с.

В качестве опорных пунктов использованы станции международной геодинимической сети IGS: MDVJ, SVTL, ZECK, KHAR. Эти пункты выбраны из-за надежной регистрации сигналов GPS и ГЛОНАСС в те периоды, когда проводились наши измерения на геодинимическом полигоне.

Результаты

Одной из главных задач ГНСС измерений при геодинимических исследованиях является достижение возможно более высокой точности определения координат геодезических пунктов.

Точность и продолжительность измерений

Обработанные и уравненные по программе Bernese 5.0 данные спутниковых измерений разной продолжительности на пунктах локальной геодинимической сети позволяют оценить влияние продолжительности регистрации спутниковых сигналов на точность определений координат. Для анализа использовались выборки среднеквадратических погрешностей (по внутренней сходимости) геоцентрических (m_x, m_y, m_z) и геодезических координат (m_N, m_E, m_U) по циклам измерений в 2012–2013 гг. Продолжительность наблюдений составляла от 6 до 96 часов. На *рис. 1* представлены распределения средних квадратичных погрешностей по данным GPS, а на *рис. 2* по данным ГЛОНАСС.

Модули средних квадратичных погрешностей всех координат уменьшаются от 2 мм до 0,2 мм с увеличением продолжительности наблюдений на пункте. Эти распределения модулей ошибок лучше всего аппроксимирует степенная функция с коэффициентом корреляции, близким к единице. Уравнения аппроксимации погрешностей для всех компонент координат и коэффициенты корреляции, определенных по измерениям погрешностей и их аппроксимированных значений для обеих систем, приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Зависимости аппроксимированных значений среднеквадратических погрешностей (m в мм, $6 < t < 96$ в час) и коэффициенты корреляции (R)

Уравнение, GPS	R , GPS	Уравнение, GLN	R , GLN
$m_x = 4,140 \times t^{-0,556}$	0,93	$m_x = 5,114 \times t^{-0,587}$	0,93
$m_y = 3,533 \times t^{-0,548}$	0,93	$m_y = 4,286 \times t^{-0,582}$	0,92
$m_z = 8,664 \times t^{-0,64}$	0,90	$m_z = 9,995 \times t^{-0,641}$	0,92
$m_N = 2,523 \times t^{-0,514}$	0,96	$m_N = 2,551 \times t^{-0,519}$	0,94
$m_E = 1,356 \times t^{-0,432}$	0,94	$m_E = 2,030 \times t^{-0,479}$	0,92
$m_U = 10,099 \times t^{-0,635}$	0,90	$m_U = 12,194 \times t^{-0,657}$	0,91

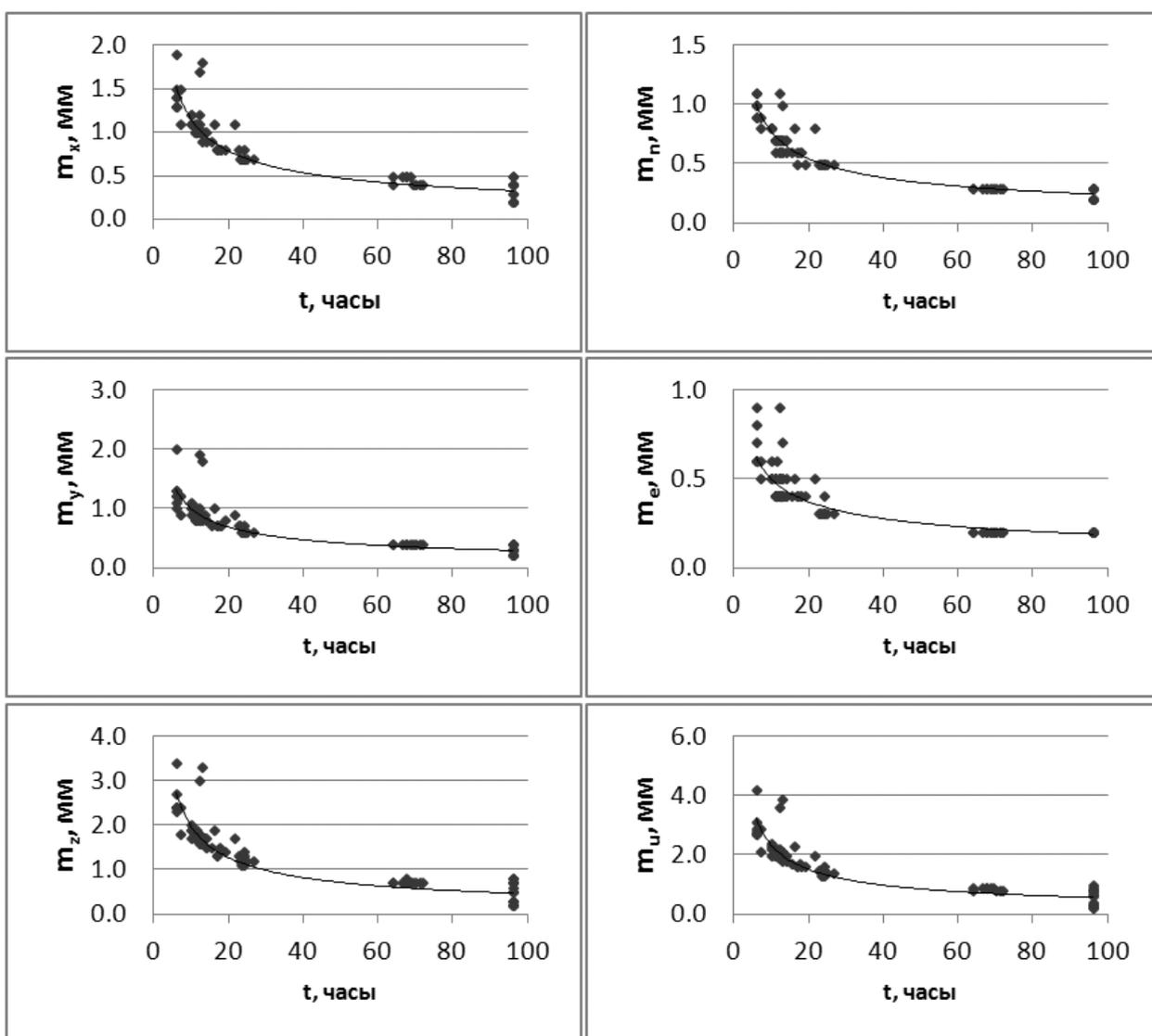


Рис. 1. Распределения ошибок координат в зависимости от длительности регистрации спутниковых сигналов GPS на пункте

Сравнительный анализ показывает, что точность определения координат по внутренней сходимости по данным GPS лучше, чем по ГЛОНАСС. Это различие достигает 20 % при непрерывных измерениях длительностью до суток и значительно уменьшается при увеличении продолжительности замеров до нескольких суток. Приведенные уравнения аппроксимации позволяют делать предварительный расчет продолжительности наблюдений на пункте при требуемой точности привязки к пунктам IGS (Международная геодезическая служба) в системе ITRF (Международная земная система отсчета).

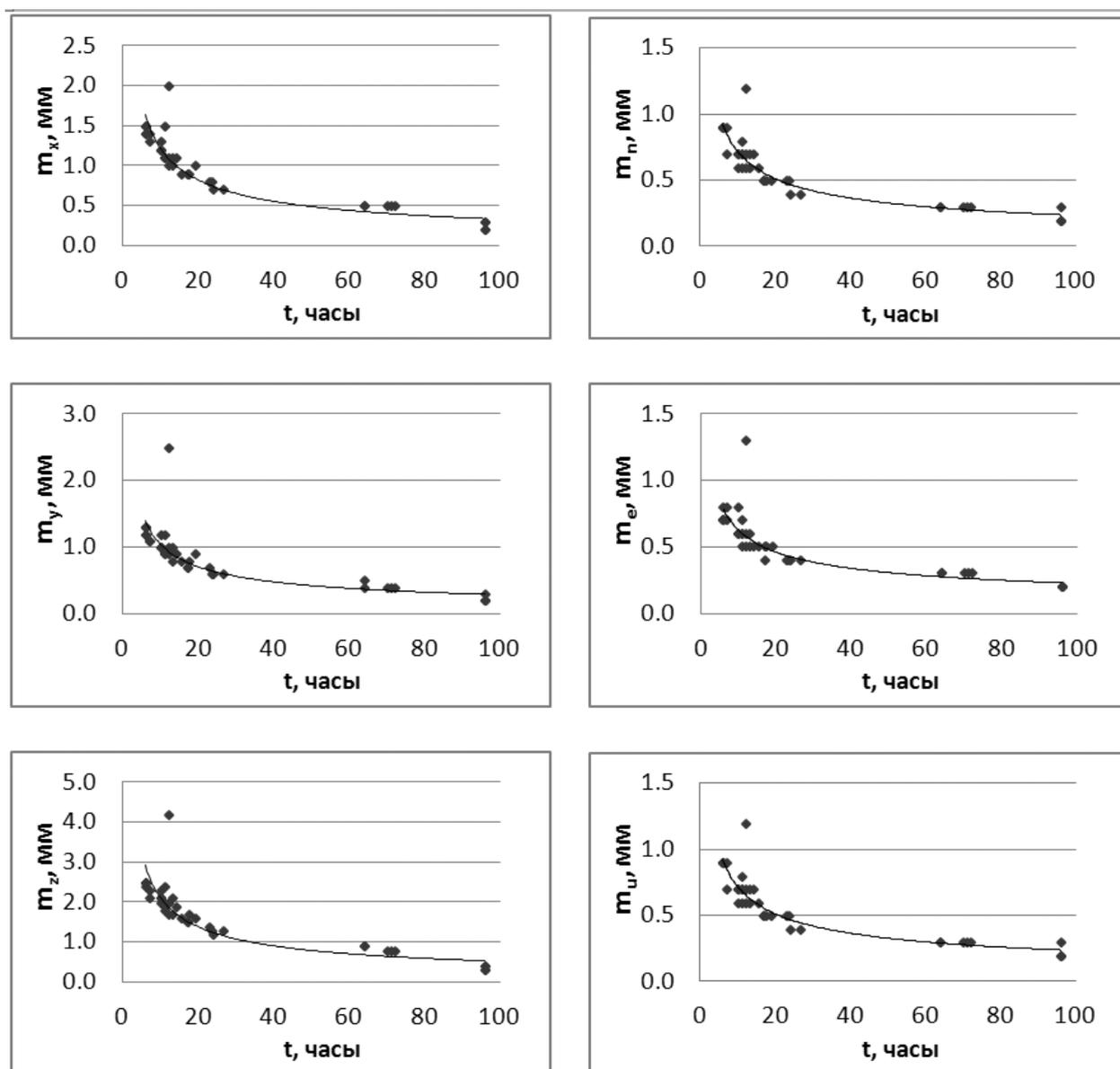


Рис. 2. Распределения ошибок координат в зависимости от длительности регистрации спутниковых сигналов ГЛОНАСС на пункте

Сопоставление координат GPS и ГЛОНАСС

Следующей задачей анализа стало сравнение геоцентрических и географических координат, полученных по данным замеров GPS ($X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS}, N_{GPS}, E_{GPS}, U_{GPS}$) и ГЛОНАСС ($X_{GLN}, Y_{GLN}, Z_{GLN}, N_{GLN}, E_{GLN}, U_{GLN}$) одновременно на одних и тех же пунктах. Данные обработаны по программе Bernese 5.0. Рассчитаны разности геоцентрических координат $X_{GPS} - X_{GLN} = \Delta X, Y_{GPS} - Y_{GLN} = \Delta Y, Z_{GPS} - Z_{GLN} = \Delta Z, N_{GPS} - N_{GLN} = \Delta N, E_{GPS} - E_{GLN} = \Delta E, U_{GPS} - U_{GLN} = \Delta U$, а также значения модулей векторов $\Delta S_{XYZ} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$ и $\Delta S_{NE} = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2}$ для пунктов локальной сети и пунктов IGS по измерениям 2012 г. и 2013 г. Используя полученные значения построены графики распределения разностей координат и модулей векторов для каждого цикла измерений, которые приведены на *рис. 3* и *рис. 4*.

Результаты статистической оценки разностей геоцентрических и геодезических координат GPS и ГЛОНАСС на минимальные, максимальные и средние значения по выборке для пунктов локальной сети и опорных пунктов IGS по двум циклам наблюдений приведены в *табл. 2*.

Таблица 2. Статистические оценки разностей геоцентрических и геодезических координат GPS и ГЛОНАСС

Статистическая оценка ΔX , мм		GPS-ГЛОНАСС							
		ΔX , мм	ΔY , мм	ΔZ , мм	ΔS_{XYZ} , мм	ΔN , мм	ΔE , мм	ΔU , мм	ΔS_{NE} , мм
	год	Локальная сеть							
Минимум	2012	-11,4	-7,3	-12,4	1,5	-17,7	-4,8	-16,5	0,8
	2013	-5,5	-5,9	-9,6	0,5	-13,6	-7,1	-7,9	0,3
Максимум	2012	11,2	20,5	14,7	22,6	8,2	16,3	13,1	22,5
	2013	9,8	30,2	24,8	31,2	11,8	21,7	21,9	25,6
Среднее	2012	0,4	2,7	3,1	11,0	0,0	1,8	3,6	7,2
	2013	2,1	3,3	4,2	11,1	-0,8	1,3	5,5	7,6
Стандартное отклонение	2012	4,9	8,2	6,9	5,8	6,8	6,1	7,5	5,7
	2013	3,4	8,9	7,1	7,0	6,7	6,9	6,9	5,9
		Пункты IGS							
Минимум	2012	-1,6	-4,0	-3,1	3,6	-1,3	-4,6	-3,5	3,5
	2013	-2,1	-2,9	-6,0	2,3	-2,7	-2,0	-6,7	1,8
Максимум	2012	2,4	4,1	4,3	5,3	2,3	3,3	3,6	5,3
	2013	2,0	3,8	-0,3	7,0	1,3	2,9	0,9	4,0
Среднее	2012	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	0,2	4,4
	2013	-0,1	-0,7	-2,1	4,0	-1,0	-0,6	-1,7	2,6

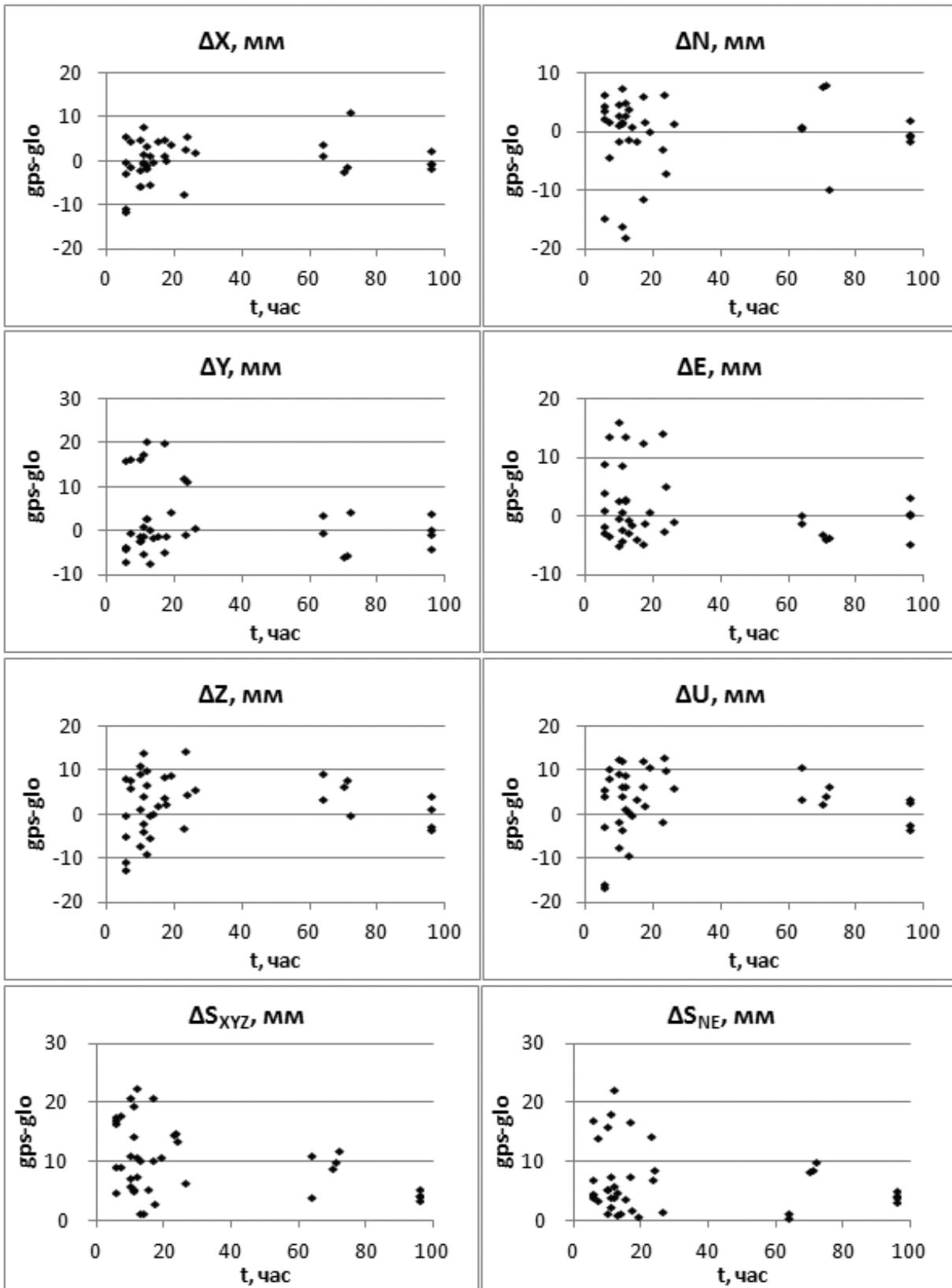


Рис. 3. Графики распределения разностей координат и модулей векторов по данным GPS и ГЛОНАС измерений в ноябре 2012 г.

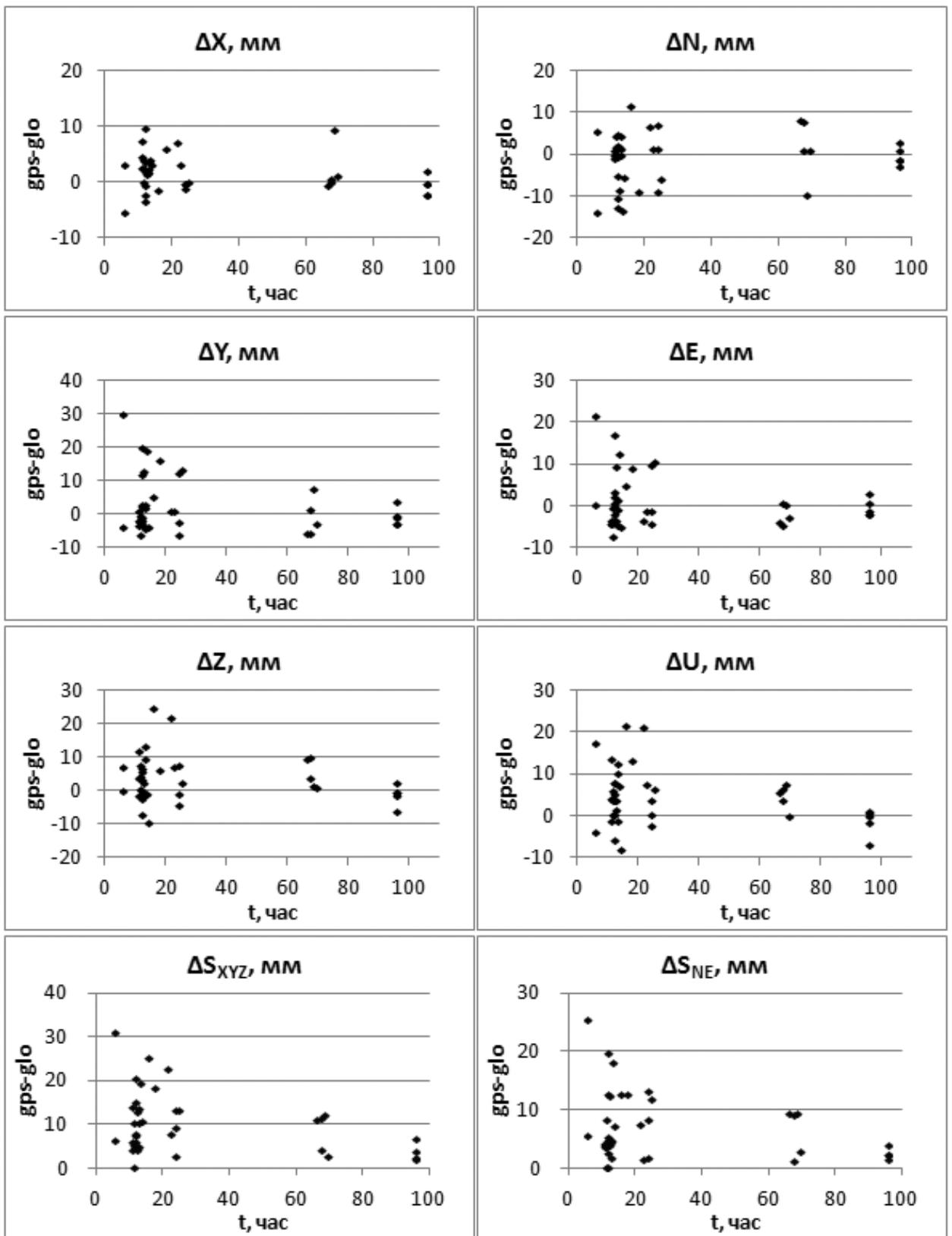


Рис. 4. Графики распределения разностей координат и модулей векторов по данным GPS и ГЛОНАСС измерений в ноябре 2013 г.

Значительная часть координат по данным GPS превышает значения координат по данным ГЛОНАСС для обоих циклов, что отражают средние значения разностей координат двух спутниковых систем, изменяющихся от 0,4 мм до 11,1 мм, при небольшом отрицательном значении по северной компоненте 2013 г. Для обоих циклов измерений геодезическая высота (U_{GPS}) по данным GPS превышает геодезическую высоту (U_{GLN}) по данным ГЛОНАСС.

Заключение

Выполненное сравнение координат и их точности по данным одновременных измерений GPS и ГЛОНАСС показало их достаточно хорошую сопоставимость. Расхождения координат по измерениям длительностью до суток в среднем составляет (3 ± 8) мм, при неблагоприятных условиях наблюдений на конкретном пункте достигает 30 мм. При увеличении продолжительности измерений на пункте различие координат, определенных разными спутниковыми системами, уменьшается и не превышает 5 мм.

Возможно, полученное различие в координатах пунктов, определенных по измерениям двух систем, связаны с точностью часов на спутниках ГЛОНАСС и будут уменьшаться с эксплуатацией новых модернизированных отечественных спутников.

Получены степенные зависимости погрешностей определения координат GPS/ГЛОНАСС от длительности наблюдений на пунктах. В настоящее время отличие погрешностей координат, определенных одновременными измерениями разными системами, может достигать 20 % в пользу GPS. Данный результат можно предложить в качестве критерия выбора режима наблюдений на пунктах спутникового мониторинга на геодинимических сетях ответственных инженерных объектов (АЭС, ГЭС, ГАЭС и др.), а исследование современных движений на геодинимических полигонах выполнять с использованием спутниковых измерений GPS + ГЛОНАСС.

Литература

1. Высокие технологии // Системы спутниковой навигации и мониторинга. 2015 г. <http://www.kakras.ru/doc/lonass-gps-galileo.html#measurement-accuracy>.
2. Галаганов О.Н., Гусева Т.В., Крупеникова И.С., Мокрова А.Н. Деформационные процессы, инициированные перемещением водных масс // Триггерные эффекты в геосистемах. М.: ГЕОС. 2013. С. 268–275.
3. Гусева Т.В., Розенберг Н.К., Передерин В.П., Черненко В.Н. Деформационный мониторинг территорий расположения ответственных инженерных объектов // ГЕОДИНАМИКА. 2011. № 2 (11). С. 75-77.
4. Деловая газета «Маркер». 20.10.2011. <http://www.lockey.ru/articles/7353/>.

Comparison of GLONASS and GPS data by differential positioning method in static mode for solving geodynamic problems

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

O.Yu. Schmidt Institute of Physics RAS

Moscow, 123995, Russia

E-mail: galagan@ifz.ru, guseva@ifz.ru

In the studies of recent movements of the earth crust on the geodynamic test sites using global navigation satellite systems, both GLONASS (Russia) and GPS (USA) signals are recorded. However, mainly GPS data are used in the processing due to large errors in coordinates determined from GLONASS data and the disparity between the coordinates obtained by the two systems. Here, the results of the analysis of precise satellite measurements by the method of differential positioning in static mode for solving geodynamic problems are presented. Data of simultaneous signal recording of GLONASS and GPS dual-system receivers at 34 points of local geodetic network in 2012 and 2013 are used. The duration of continuous measurement at the points ranged from 6 hours to four days. The processing was performed using Bernese 5.0 software. The dependence of the coordinates error on the duration of measurement was established as a power function. This dependence can serve as a criterion for the organization of geodynamic studies using GNSS measurements. The accuracy of coordinates determination using GLONASS data is up to 20 % worse than using GPS data. Special attention is paid to the comparability analysis of coordinates in ITRF computed from GLONASS and GPS measurements. The differences of the coordinates determined from measurements up to 24 hours is ± 10 mm, under adverse observational conditions – up to 30 mm. With the increase in measurement duration, the discrepancy between coordinates determined by different systems decreases to 5 mm.

Keywords: GLONASS, GPS, measurements, coordinates, location accuracy, duration of registration, distribution, approximation, the comparison, criterion

References

1. <http://www.kakras.ru/doc/glonass-gps-galileo.html#measurement-accuracy>.
2. Galaganov O.N., Guseva T.V., Krupennikova I.S., Mokrova A.N. Deformatsionnye protsessy, initsirovannyye peremeshcheniem vodnykh mass (Deformational processes initiated by water masses), *Triggernyye efekty v geosistemakh*, Moscow: GEOS, 2013, pp. 268–275.
3. Guseva T.V., Rozenberg N.K., Perederin V.P., Chernenko V.N. Deformatsionnyi monitoring territorii raspolozheniya otvetstvennykh inzhenernykh ob'ektov (Deformational monitoring of the territories of location responsible engineering objects), *Geodinamika, nauchii zhurnal*, 2011, No. 2 (11), pp. 75–77.
4. Delovaya gazeta "Marker", 20.10.2011, available at: <http://www.lockey.ru/articles/7353/>.