

УДК 550.831.015: 550.831.23: 519.654

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОТЫ ТОЧКИ НАБЛЮДЕНИЯ ПО ДАННЫМ GPS ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

© 2018 г. А.А. Илюхин¹, В.Н. Конешов²

¹ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

В ходе длительных экспериментальных исследований, проводимых для расположенных на земной поверхности неподвижных точек наблюдения с помощью высокоточной измерительной *GPS* аппаратуры в дифференциальном режиме работ, были выявлены методические погрешности получения данных об их высоте. Названные эксперименты имели своей целью оценку потенциальной возможности использования *GPS* навигации для регистрации суточных изменений высоты земной поверхности, происходящих под влиянием лунно-солнечных приливов. Эксперименты проводились в течение нескольких месяцев; длительность каждой из непрерывных записей первичной информации составляла 14 суток.

Полученные результаты подтверждают невозможность отображения вертикального перемещения земной поверхности под влиянием лунно-солнечных приливов по данным *GPS* приемников. Предложен способ обнаружения и частичного устранения выявленных методических погрешностей при оценке высоты точки наблюдения.

Ключевые слова: гравиметрия, долговременные приливные гравиметрические наблюдения, геодинамические движения, *GPS* измерения, методические погрешности измерений, высокочастотные вертикальные перемещения.

Введение

При изучении геодинамических свойств земной поверхности одним из актуальных является вопрос о возможности применения в качестве вспомогательного средства при регистрации суточного изменения высоты неподвижной точки наблюдения, происходящего под влиянием лунно-солнечных приливов, спутниковой системы *GPS* навигации [Постановление..., 2012].

Основной целью данной работы было выяснение, какой вклад вносит в конкретный результат определения высоты точки наблюдения методика обработки в дифференциальном режиме *GPS*. Для получения ответа на этот вопрос с мая по сентябрь 2016 г. на полигоне “Запольское” Владимирского государственного университета (ВлГУ) проводились экспериментальные работы по оценке характера изменения высоты расположенной на земной поверхности неподвижной точки с использованием двух высокоточных *GPS* приемников фирмы *Javad*.

Постобработка полученных первичных данных выполнялась в дифференциальном режиме *DGPS* (*Differential Global Positioning System*), который был выбран как один из самых точных, что подтверждалось экспериментальными работами в условиях геофизической обсерватории [Илюхин, Конешов, 2016].

Проведение экспериментальных работ

При реализации дифференциального режима в качестве приемной базовой станции использовался двухчастотный *GPS* приемник *Prego-T*, а в качестве приемной станции *Rover* – двухчастотный *GPS* приемник *Sigma*.

Высокоточные приемные антенны *RingAnt-G3T* обоих *GPS* приемников располагались на открытой местности на расстоянии ~100–120 м друг от друга. На рис. 1 приведен пример размещения на земной поверхности одной из высокоточных антенн; вторая располагалась аналогичным образом.



Рис. 1. Размещение на земной поверхности одной из высокоточных приемных антенн *RingAnt-G3T*; вторая антенна располагается аналогичным образом на удалении ~100–120 м

Fig. 1. The high-precision receiving antenna *GPS RingAnt-G3T* on the surface; the second antenna is similarly located at a distance of ~100–120 m

Выбранное расстояние 100–120 м исключало прием сигналов от разных созвездий *GPS* спутников и при разных углах их наблюдения для каждой из антенн. Эксперименты предполагали равноправие применяемых антенн при решении вопроса об их использовании в качестве антенны базовой станции или антенны приемной станции *ROVER*. Оба измерительных приемника были установлены в помещении сейсмогравиметрической обсерватории “Запольское” на загородном экспериментальном полигоне ВлГУ в точке, имеющей геодезическую привязку [Конешов, Абрамов, Дорожков, 2010; Илюхин, Конешов, 2014а,б].

В ходе экспериментов первичные навигационные данные с частотой фиксации 1 Гц записывались в формате *.jps в энергонезависимую память *GPS* приемников. Используемая приемная аппаратура фирмы *Javad* позволяет работать одновременно с тремя

основными глобальными навигационными системами – *GPS*, ГЛОНАСС и *Galileo*. Однако приемники *Prego-T* и *Sigma* имеют только одну разблокированную опцию, предназначенную для работы с навигационной системой *GPS*, в связи с чем при их использовании исключается возможность сравнения точностных характеристик, предоставляемых двумя другими системами.

Для камеральной постобработки первичных данных применялся сертифицированный пакет программ с открытым исходным кодом RTKLIB v2.4.3¹. Этот пакет предоставляет широкие возможности как для проведения постобработки, так и для обработки *GPS* данных в режиме реального времени с непосредственным подключением к приемнику персонального компьютера (ПК) или с использованием удаленного (телеметрического) подключения к нему по системе *Ethernet*. Функционально пакет программ разбит на семь основных рабочих подпрограмм:

RTKPLOT – программа для просмотра результатов обработки *GPS* данных;

RTKCONV – программа для конвертирования файлов с разных приемных устройств в единый стандарт формата *.RINEX для последующей обработки;

STRSVR – программа для получения данных с *GPS* приемника и отправки полученных результатов по сети в режиме реального времени на другие ПК;

RTKPOST – программа, позволяющая производить камеральную постобработку данных в трех условно разделенных основных режимах: *DGPS/DGNSS (Kinematic, Static, Movig-base, Fixed)*, *PPP(Kinematic, Static, Fixed)*, *Single*;

NTRIP Browser – программа для управления сетевым трафиком и организации передачи файлов RTK поправок к приемникам, подключенным по сети *Ethernet*;

RTKNAVI – программа, позволяющая в режиме реального времени обрабатывать и выводить на ПК данные, полученные с любых *GPS* приемников;

RTKGET – программа, обеспечивающая централизованное скачивание из разных источников и сервисов сети *Ethernet* файлов поправок для использования при камеральной постобработке.

Нами для работы были задействованы только четыре основные программы – RTKGET, RTKPOST, RTKPLOT, RTKCONV. До этапа постобработки первичные данные в формате *.jrs из обоих приемников при помощи программы RTKCONV преобразовывались (конвертировались) в формат *.RINEX для последующей посуточной обработки с использованием программ RTKPLOT, RTKCONV.

С учетом имеющегося опыта [Илюхин, Дорожков, 2013; Илюхин, Конешов, 2014а,б, 2016] при реализации дифференциального режима камеральной постобработки данных в программе RTKPOST были выставлены следующие основные опции:

а) метод постобработки – *GDPS Kinematic* (в целях отслеживания изменения местоположения антенны приемника *ROVER* относительно антенны базового приемника);

б) частотные диапазоны – фильтрация L1+L2+L5, фильтр комбинированный;

в) маска по углу наклона спутников – рабочий угол наклона выбран $\geq 30^\circ$; отношение сигнал/шум задано по умолчанию;

г) учет земных приливов – опция отключена;

д) положение базовой станции учитывалось при обработке (координаты и высота выбирались автоматически из файла базовой станции).

Для получения прецизионного результата конвертированные исходные данные в формате *.RINEX с обоих приемников (базового и *ROVER*) указывались в соответствующих графах программы; дополнительно подгружались файлы с корректировками часов (*.clk) и эфемерид (*.sp3) через программу RTKGET с сервиса *IGS* (рис. 2).

¹ Сантиметровая точность *GPS*/ГЛОНАСС в пост-обработке см. <http://habrahabr.ru/post/244475>.

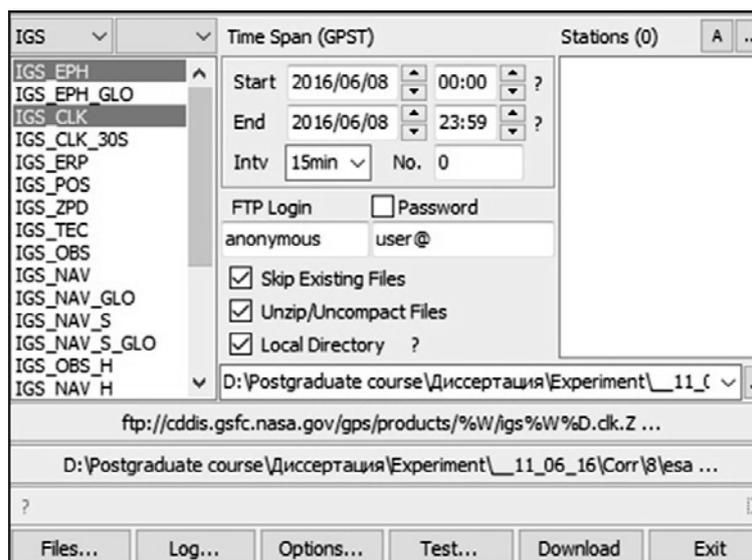


Рис. 2. Пример загрузки файлов с корректировками часов (*.clk) и эфемерид (*.sp3) (скриншот программы RTKGET, сервис IGS)

Fig. 2. Example of file loading with time corrections (*.clk) and ephemerides (*.sp3) (RTKGET software, IGS service)

Завершив процесс постобработки, программа формировала файл с координатами в формате *.pos, для дальнейшей обработки которого использовался пакет *Matlab* 2013 [Ануфриев, 2002; Дьяконов, 2008; Исследование ..., 2011], обеспечивающий фильтрацию данных по высоте и построение графика оценки изменений высоты точки наблюдений.

При обработке временных рядов в режиме *DGPS* рассматривались спектры изменения высоты точки наблюдения, в которых выявлялись составляющие, обусловленные изменением высоты размещенной на поверхности земли антенны приемника *ROVER*. Для повышения точности получаемых результатов при камеральной постобработке использовались файлы из открытого портала *IGSNASA*, содержащие корректировки по характеристикам изменения эфемерид и часов для соответствующих суток.

График ожидаемого суточного изменения высоты точки наблюдения на земной поверхности под влиянием лунно-солнечных приливов представлен на рис. 3.

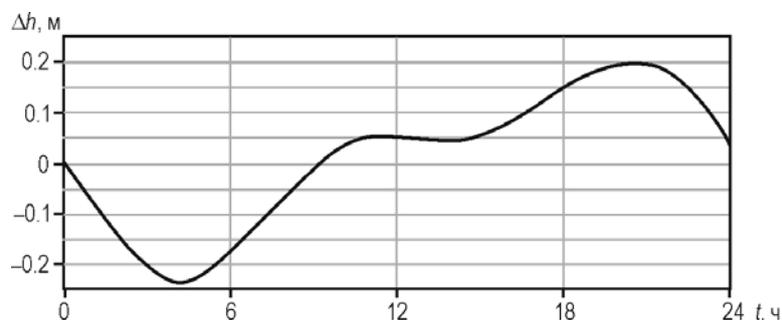


Рис. 3. График ожидаемого суточного изменения под влиянием лунно-солнечных приливов высоты точки наблюдения, расположенной на земной поверхности (Δh)

Fig. 3. The expected diurnal variation in the altitude of the observation point on the Earth's surface Δh (in m) due to lunar-solar tides

Изменение высоты точек, в которых расположены антенны, регистрируется высокоточными гравиметрами [Конешов, Абрамов, Дорожков, 2010; Дробышев, Конешов, 2015; Дробышев, Конешов, Непоклонов, 2016]. Поскольку приливная волна одновременно “поднимает” антенны дифференциального режима, предполагалось, что в течение суток разница между высотами двух антенн будет оставаться постоянной и содержать только инструментальные шумы *GPS* приемников.

Анализ полученных результатов

Результаты камеральной обработки представляются в виде графиков, позволяющих оценить характер изменения высоты как в течение 24 ч, так и в течение двух недель (рис. 4). Ограничение временного интервала записи первичных данных двумя неделями связано с ёмкостью энергонезависимой памяти, встроенной непосредственно в измерительное *GPS* оборудование. Запись первичных данных на ПК не представлялась возможной ввиду конструктивных ограничений используемой измерительной аппаратуры. Необходимо отметить, что получаемое в режиме *DGPS* решение от суток к суткам является случайным и стационарным.

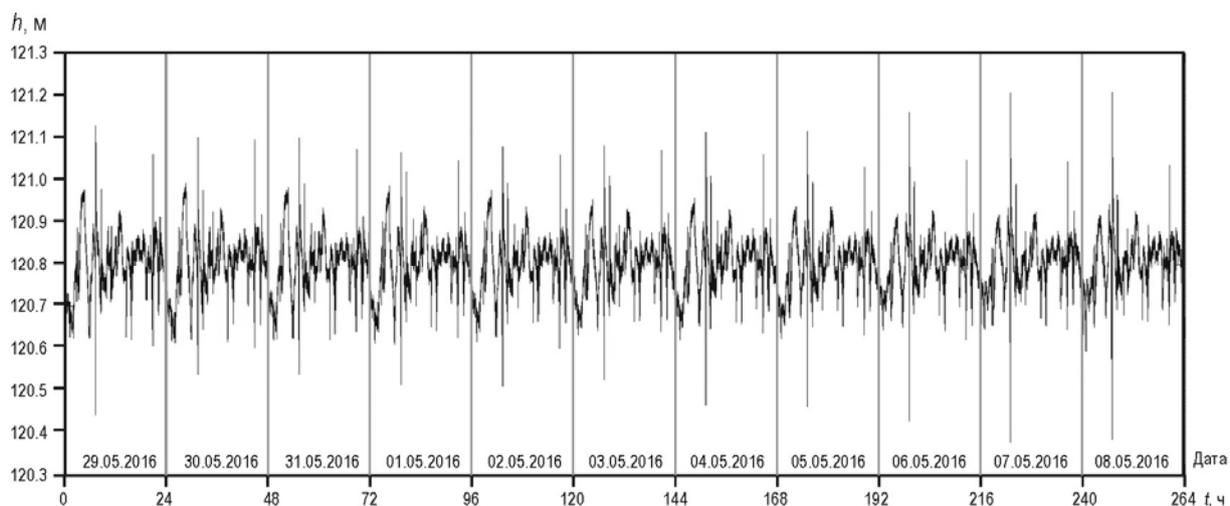


Рис. 4. Результаты постобработки в режиме *DGPS* первичных данных за 11 сут с 29.05. по 08.06.2016 г. График изменения высоты точки наблюдения, расположенной на земной поверхности

Fig. 4. Results of processing of initial 11-days data (from 29.05. to 08.06.2016) in *DGPS* regime. Plot shows changes in height of the observation point on the surface

Результаты постобработки первичных данных с *GPS* приемников в дифференциальном режиме для расположенной на земной поверхности неподвижной антенны не отразили влияние суточного приливного эффекта. В то же время отсутствие постоянного значения высоты точки наблюдения можно объяснить принципом формирования решения в *GPS* системе. В разностнофазовом дальномерном способе решения значений координат по отношению к линиям равных фаз формируются под углами, практически близкими к прямым, в то время как значения высот получаются под углами $<90^\circ$. Малые погрешности разности фаз могут при расчетах значений высоты давать “отскоки”, наблюдаемые на рис. 4.

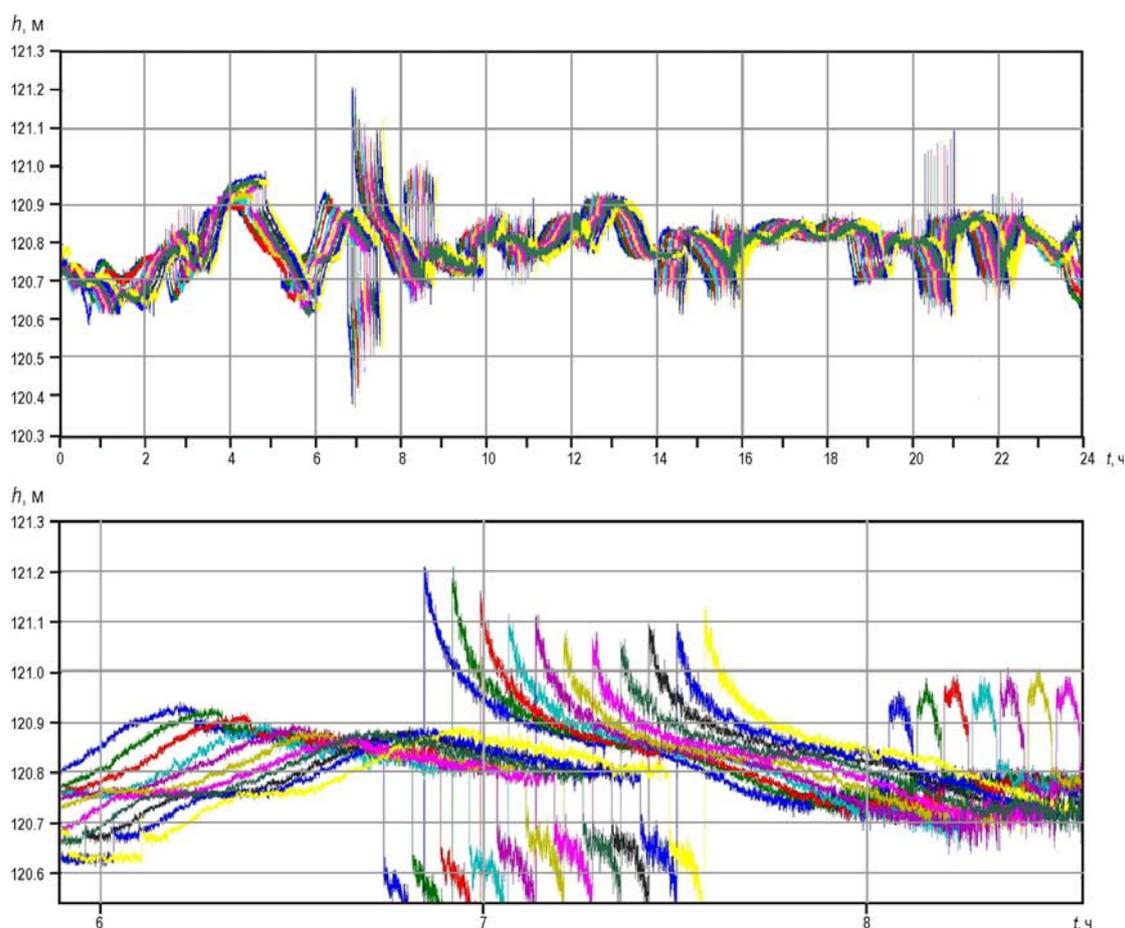


Рис. 5. Результаты постобработки в режиме *DGPS* первичных данных за 11 сут с 29.05. по 08.06.2016 г. *Вверху* – графики, приведенные на рис. 4, построенные для сравнения в интервале 24 ч; *внизу* – фрагмент графиков в более крупном масштабе для оценки смещения по времени получаемых характеристик. Разными цветами представлены графики для разных дат наблюдений

Fig. 5. Results of processing of initial 11-days data (from 29.05. to 08.06.2016) in *DGPS* regime. (Top) plots as in Fig. 4 for 24-hours duration. (Bottom) plot segments in the larger scale for estimating the time differences of the characteristics obtained. Different dates of observations are shown by various colors

Характер изменения высоты по *GPS* системе в течение каждых суток аналогичен изменениям в предшествующие. При этом наблюдается четко выраженное смещение начала изменений на 4 мин влево по оси времени относительно предшествующих суток. В результате, возникают два вопроса: почему при долгосрочном эксперименте не отражается суточный прилив и почему на полученных графиках прослеживается смещение суточных характеристик влево на ~4 мин в каждые последующие сутки?

Для получения ответа на второй вопрос был проведен дополнительный анализ движения спутников относительно измерительного приемника. Поскольку для всех видимых в данной местности *GPS* спутников результаты однотипны, на рис. 6 в качестве примера представлены графики, отображающие появление и перемещение одного из них – спутника G06. Приводимые на графиках параметры отображают движение спутника по отношению к приемнику по времени появления спутника. Для оценки взяты показания по орбитам с *GPS* приемников за двое суток – 01.06.2016 г. и 02.06.2016 г.; стрелками на горизонтальной оси отмечены моменты появления спутника G06.

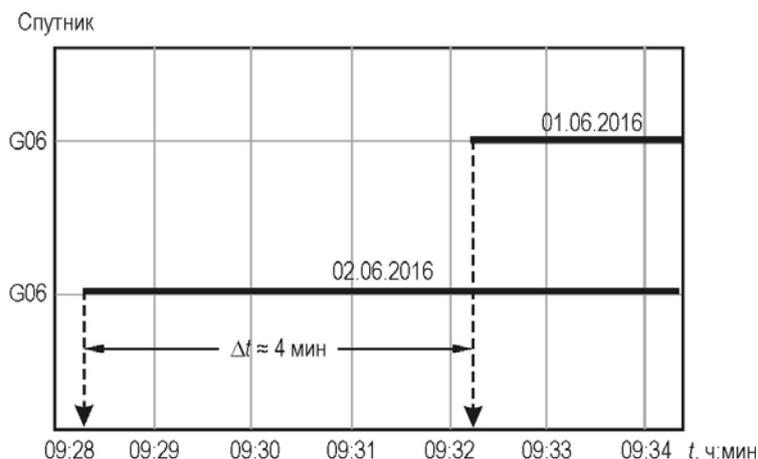


Рис. 6. Графики, отображающие появление и перемещение спутника G06 во времени. Наблюдения 01.06.2016 г. и 02.06.2016 г. Комментарии в тексте

Fig. 6. Appearance and displacement of the G06 satellite in time. Observations from 01.06.2016 and 02.06.2016. Comments are in text

Для установления причины смещения суточных характеристик были построены графики, позволяющие считать, что этой причиной является появление спутников в новых сутках на 4 мин раньше, чем в предшествующих. Как и предполагалось [Шануров, Остроумов, 2004], по углу наклона орбит спутников отклонения выявлены не были.

Стационарный характер методических погрешностей (см. рис. 4, 5) позволяет предложить вариант учета разброса оценок высоты точки наблюдения, основанный на результатах наложения друг на друга данных для двух последовательных дат. Наложение оценок предыдущего дня (07.06.2016 г.) на оценки следующего (08.06.2016 г.) было выполнено со смещением на 4.15 мин влево по временной оси. Приведенная на рис. 7 разница оценок высоты точки наблюдения за эти два дня может служить оценкой среднеквадратического отклонения отсчетов высоты точки наблюдений ($\sigma \approx 0.03$ м) для среднего значения высоты, составляющего 120.76 м.

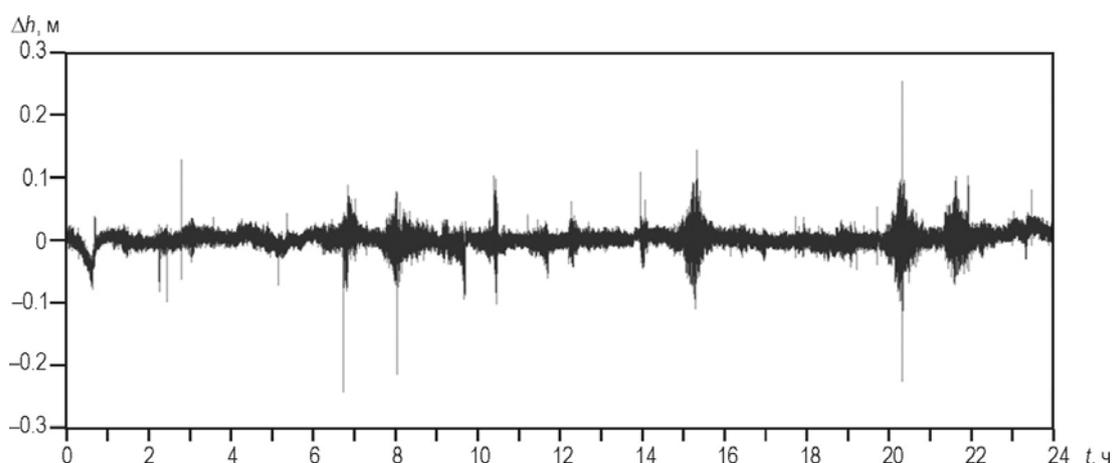


Рис. 7. График разницы оценок высоты точки наблюдения по данным за 07.06.2016 г. и 08.06.2016 г., полученный в результате наложения со смещением на 4.15 мин. Комментарии в тексте

Рис. 7. Difference in estimates of the observation point altitude, according to data of 07.06.2016 and 08.06.2016, obtained as imposition with the bias of 4.15 min. Comments are in text

Заключение

Выполненные эксперименты позволяют сделать следующие выводы.

1. Полученные результаты подтверждают невозможность отображения вертикального перемещения точки наблюдения под влиянием лунно-солнечных приливов по данным *GPS* приемников в дифференциальном режиме.

2. Даже при малом расстоянии между антенной базовой станции и антенной *ROVER* отсутствует постоянное значение оценки высоты точки наблюдения, что обусловлено, скорее всего, малыми углами между линиями равных фаз и направлением вертикали высоты точки наблюдения.

3. Выявлено и подтверждено, что погрешности измерения высоты по данным *GPS* приемников повторяются изо дня в день с характерным смещением влево по временной оси, свидетельствуя о зависимости показаний высоты и от движения спутникового созвездия вокруг земного шара.

4. Показана возможность уменьшения среднеквадратической погрешности оценок высоты точки наблюдения при использовании дифференциального режима *DGPS*.

Литература

- Ануфриев И.Е.* Самоучитель MatLab 5.3/6.x. СПб.: БХВ-Петербург, 2002. 736 с.
- Дробышев М.Н., Конешов В.Н.* Оценка величины вертикального движения точки на земной поверхности по геофизическим данным // Сейсмические приборы. 2015. Т. 51, № 4. С.22–28.
- Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Непоклонов В.Б.* Уточнение вертикального положения точки на земной поверхности по геофизическим данным // Известия вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. 2016. № 1. С.14–18.
- Дьяконов В.П.* Matlab7.* / R2006 / R2007: Самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2008. 768 с.
- Илюхин А.А., Дорожков В.В.* Оценка эффективности метода *DGPS* позиционирования в условиях геофизической обсерватории // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 10-й Международной научно-технической конференции. Владимир: ВлГУ, 2013. Т. 2. С.130–132.
- Илюхин А.А., Конешов В.Н.* Экспериментальная оценка возможностей *GPS* позиционирования в условиях геофизической обсерватории // Труды XI Международной научной конференции “Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии” ФРЭМЭ’2014. Владимир; Суздаль: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2014а. С.124–127.
- Илюхин А.А., Конешов В.Н.* Об оценке погрешностей *GPS* наблюдений при комплексных приливных измерениях // Сейсмические приборы. 2014б. Т. 50, № 4. С.58–65
- Илюхин А.А., Конешов В.Н.* К выбору метода обработки *GPS* измерений геодинимических перемещений точки земной поверхности в высокочастотном диапазоне // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 2. С.39–45.
- Исследование алгоритмов обработки сигналов в системе Matlab: Метод. указания к лабораторным работам. Владимир: ВлГУ, 2011. 126 с.
- Конешов В.Н., Абрамов Д.В., Дорожков В.В.* Особенности построения и использования наземного сейсмогравиметрического комплекса // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 4. С.5–13.
- Постановление Правительства Российской Федерации “О единых государственных системах координат” № 1463 от 28.12.2012.
- Шануров Г.А., Остроумов В.З.* Влияние геометрии спутниковых наблюдений на точность определения геодезических высот уровневых постов // Известия вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. 2004. № 1. С.3–12.

Сведения об авторах

ИЛЮХИН Александр Александрович – аспирант Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. 600000, Владимир, ул. Горького, д. 87. Тел.: +7(920) 622-57-64. E-mail: vlsuiluxin@mail.ru

КОНЕШОВ Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-35. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

METHODICAL ERRORS IN THE OBSERVATION POINT ALTITUDE FROM GPS MEASUREMENTS WITH THE DIFFERENTIAL PROCESSING

A.A. Iljukhin¹, V.N. Koneshov²

¹ Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov, Vladimir, Russia

² Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. During long term experimental works of GPS measurements carried out for stationary points on the Earth's surface in the DGPS regime, the methodical errors in the altitude data were revealed. The experiments were conducted with the aim to assess potential GPS navigation possibilities to register the altitude of the underlying Earth surface position varying due to lunar-solar tides. Experiments were carried out during several months. Every continuous measurement data record lasted 14 days. The obtained results explain and confirm the absence of potential possibility to image vertical movements of the Earth's surface due to lunar-solar tidal observations at North-West of the Eurasian continent in accordance to GPS receiver data. The method of the methodical errors of altitude data survey detection and partial elimination was submitted.

Keywords: gravimetry, long term tidal gravimetric observations, geodynamic movements, vertical and horizontal channels of GPS measurements, the errors of high frequency vertical and horizontal movements measurements by GPS receiver.

References

- Anufriev I.E. *Samouchitel' Matlab* (Manual for self-tuition MatLab 5.3/6.h), St.-Petersburg: BHB-Peterburg, 2002.
- Djakonov V.P. *Matlab, samouchitel'* (Matlab7.*/R2006/R2007: Manual for self-tuition), Moscow: DMK Press, 2008.
- Drobyshev M.N and Koneshov V.N. The assessment of a point on Earth surface vertical movement value by geophysical data, *Seismic instruments*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 22-28.
- Drobyshev M.N., Koneshov V.N., and Nepoklonov V.B. The definition of a point on Earth surface vertical movement value by geophysical data, *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka* (Proceedings of higher educational establishments. Geodesy and aerial photographic survey), 2016, no. 1, pp. 14-18.
- Iljukhin A.A. and Dorozhkov V.V. The estimation of DGPS positioning method effectiveness in geophysical observatory conditions, *Perspektivnye tekhnologii v sredstvakh peredachi informatsii* (New technologies in means of communication. Proc. 10-th Int. Conf.), Vladimir-Suzdal, July, 26-28, 2013, pp. 130-132.
- Iljukhin A.A. and Koneshov V.N., The experimental estimation of GPS positioning potentialities in geophysical observatory conditions, *Trudy XI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* (Proc. XI Int. Conf. "Physics and radio electronics in medicine and ecology"), Vladimir-Suzdal: VGU, 2014a, pp. 124-127.
- Iljukhin A.A and Koneshov V.N., About estimation of GPS observations errors by complex tidal measurements, *Seismic instruments*, 2014b, vol. 50, no. 4, pp. 58-65.

- Ilyukhin A.A. and Koneshov V.N. About selection of the GPS geodynamic Earth surface point movements in high frequencies range interpretation method, *Seismic instruments*, 2016, vol. 52, no. 2, pp. 39-45.
- Issledovanie algoritmov obrabotki signalov v srede Matlab* (Algorithms of signal processing in MatLab, Manual), Vladimir: VIGU, 2011.
- Koneshov V.N., Abramov D.V., and Dorozhkov V.V., Specialties of a terrestrial seismogravimetric development and exploitation, *Seismic instruments*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 5-13.
- Postanovlenie pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii "O edinykh gosudarstvennykh sistemakh koordinat № 1463 ot 28.12.2012* (The Decree of the Russian Federation Government "About integral federal coordinate systems" No. 1463 December 28, 2012.
- Shanurov G.A. and Ostroumov V.Z., The satellite observations geometry impact on the geodesic highs of level posts definition accuracy, *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka* (Proceedings of higher educational establishments. Geodesy and aerial photographic survey, 2004, no. 1, pp. 3-12.