Результаты экспериментального зондирования координат навигационных приемников в Нальчике и на пике Терскол в марте-мае 2015 г.

А.В. Тертышников

Одночастотным методом по первой рабочей частоте и всему видимому созвездию КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS рассчитаны оценки псевдопозиционирования использованных в эксперименте геодезических приемников в Нальчике и на пике Терскол.

Приведены результаты зондирования ионосферы над Эльбрусом и Нальчиком по двум рабочим частотам ГНСС с калибровкой по модели IRI-2011.

По рассчитанным псевдокоординатам отмечено сближение использованных в эксперименте пунктов наблюдений перед Непальским землетрясением 25.04.2015 г. из-за разной плотности ионосферы.

Ключевые слова: позиционирование, ионосферная задержка, ионосфера, ГЛОНАСС, GPS, содержание электронов, приемник, технология, модель, геодвижения, землетрясение, магнитная буря

Введение

В марте-мае 2015 г. в Приэльбрусье проводились эксперименты с приемом сигналов космических аппаратов (КА) Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS. Геодезические навигационные приемники были установленны в Нальчике на крыше ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (Росгидромет) и на пике Терскол (ГАИШ МГУ). Обработка принятых характеристик сигналов ГНСС проводилась авторским методом зондирования ионосферы и геодвижений [1, 2].

Методом наименьших квадратов для зафиксированных по первой рабочей частоте ГНСС ГЛОНАСС/GPS псевдодальностей навигационных КА с итерациями для минимизации среднеквадратического отклонения рассчитывались оценки псевдопозиционирования приемных антенн навигационных приемников [1, 3]. В отличие от внутренних алгоритмов приемовычислителей геодезических навигационных приемников, в расчетах использовались все видимые КА ГЛОНАСС/GPS под углом более 10 градусов над горизонтом. Увеличение количества КА использовано для большего охвата зондируемой атмосферы. При этом уменьшается точность расчетов оценок псевдопозиционирования до среднеквадратических отклонений в сотни метров [4].

Приемник в Нальчике проводил зондирование через каждые 10 секунд. На пике Терскол через каждые 30 сек.

Результаты зондирования геодвижений

В ходе обработки данных с навигационных приемников было установлено, что на результаты расчетов псевдокоординат влияют орографические эффекты. Например, Эльбрусом частично экранируется северный сектор видимости КА ГЛОНАСС/GPS для приемника на Терсколе (рис. 1).

Для южного сектора небольшая экранировка обусловлена Чегетом.

Экранировка увеличивает среднеквадратическое отклонение рассчитываемых оценок псевдопозиционирования.

Тертышников А.В., дтн, СНС, ФГБУ ИПГ, Москва, Россия



Рис. 1. Проекции траекторий подионосферных точек видимых в течение суток КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS на станции Терскол 17.03.2015 г.

На рис. 2 представлены рассчитанные среднесуточные оценки псевдокоординат антенн приемников в Нальчике и Терсколе.



Рис. 2. Изменение среднесуточных оценок псевдошироты и псевдодолготы приемников в Нальчике (a) и на пике Терскол (б) в марте-мае 2015 г.

При анализе этих графиков следует обратить внимание на различия в изменении оценок псевдошироты и псевдодолготы. В апреле в Нальчике проявилась тенденция уменьшения оценок псевдодошироты и псевдодолготы. Тенденция уменьшения оценок псевдодолготы проявилась в апреле с небольшой задержкой и на Терсколе, где с 8.04.2015 г. до 20.04.2015 г. приемник был выключен.

Рассчитанные разности среднесуточных оценок по широте и по долготе приемников в Нальчике и Терсколе представлены на рис. 3.



Рис. 3. Изменение разности среднесуточных оценок широты и долготы приемников в Нальчике и на Терсколе в марте-мае 2015 г.

За апрель разности оценок псевдоширот Нальчика и Терскола уменьшились. В тенденции изменения разности оценок псевдодолгот существенных изменений не проявилось.

Дискуссия

Не смотря на значительную погрешность оценивания координат одночастотным методом, приведенные на рис. 3 оценки можно интерпретировать как сближение пунктов зондирования за время эксперимента не менее чем на метр. Имеющиеся оценки радарной съемки смещений земной поверхности вблизи от Непальского землетрясения того же порядка [6], как и результаты моделирования смещений в эпицентральной зоне Непальского землетрясения при общем направлении смещений на юг и немного на юго-запад в [7]. Величина горизонтальных смещений вблизи эпицентра оценена в метры.

Однако при использовании двух рабочих частот ГНСС и ресурсов [8, 9] не было выявлено существенных изменений в оценках позиционирования Нальчика и Терскола. Скорее всего из-за того, что в алгоритмах [8, 9] используется оптимальная конфигурация нескольких КА GPS, а не все видимые КА ГНСС, как в [1, 2].

Возможную причину рассчитанных псевдосмещений навигационных приемников, следует искать в ошибках расчетов, на которые влияют ионосферные и тропосферные ошибки, ошибки часов. Инструментальные и аппаратные ошибки являются систематическим и могут быть нивелированы. Для калибровки измерений использовались данные модели IRI-2011 и эксперименты на базе ФГБУ «ИПГ».

За счет возмущений ионосферы, обусловленных подготовкой Непальского землетрясения, могло увеличиться видимое количество КА ГНСС, использованных в расчетах оценок псевдопозиционирования, и соответствующие ошибки.

Действительно, плотность ионосферы до мая над пунктами зондирования росла (рис. 4).



Рис. 4. Среднесуточные оценки ПЭС над Нальчиком (а) и над Терсколом (б) с оценками среднеквадратического отклонения

Сильная магнитная буря 17.03.2015 г. [10-12] и возмущения Кр-индекса в апреле и мае проявились в вариациях полного содержания электронов в вертикальном столбе ионосферы (ПЭС). Но длительность этих вариаций не сравнима с продолжительностью достаточно выраженных тенденций в изменении псевдокоординат в апреле. Изменение оценок планетарного Кр-индекса [12] представлено на рис. 5.



Для оценивания возможного влияния тропосферных ошибок на результаты расчетов псевдокоординат были получены оценки интегрального влагосодержания в вертикальном столбе атмосферы (в мм) над Нальчиком (рис. 6).



Рис. 6. Изменение интегрального влагосодержания в вертикальном столбе атмосферы (в мм) в марте-мае 2015 г. над Нальчиком с аппроксимирующей красной кривой на основе полинома 6 порядка.

В расчетах использовалась программа TropoGNSS [13].

Резкие всплески интегрального влагосодержания на рис. 6 соответствуют прохождению атмосферных фронтов. Затяжная весна 2015 г. в Приэльбрусье и очевидная тенденция увеличения оценок интегрального влагосодержания после Непальского землетрясения проявилась на рис. 6. Сильные землетрясения часто сигнализируют о перестройке атмосферной циркуляции [14-16].

Для приемника на Терсколе тропосферная ошибка не рассматривалась из-за его высотного расположения.

Ошибки часов КА ГНСС могут достигать метра [2], но они регулярно нивелируются.

Среди рассмотренных ошибок лишь увеличение плотности ионосферы отчасти соответствует рассчитанному псевдосближению Нальчика и Терскола.

Детализация результатов зондирования ионосферы над Эльбрусом представлена в табл. 1.

Период	По ПЭС, калиброванным по IRI-2011				Относительное ТЕС по фазовым измерениям			
	Ростов	ГАС ГАО РАН (43,74146 с.ш.,42,66348 в.д.)	Терскол (43,27479 с.ш.,42,50108 в.д.)	Нальчик (43,46916 с.ш.,43,58631 в.д.)	Ростов	ΓΑС ΓΑΟ	Терскол	Нальчик
Март 2015 г.	Нет дан- ных	-	20,7128	20,5827	Нет дан- ных	-	32,2420	27,5872
16 марта			20,7519	20,5449			32,1993	27,4940
17 марта			20,9850	20,8760			35,1606	30,4689
18 марта			20,3412	20,0996			27,8561	23,2414
19 марта			19,6333	19,9401			21,4790	17,3973
20 марта			20,0676	20,0184			26,0910	21,6152
21 марта			20,7589	20,7045			29,5256	24,8655
22 марта			21,4319	21,2347			33,0230	28,3252
1-7 апреля 2015 г.	17,79007	-	23,0318	22,9010	27,3734	-	36,0998	31,9242
21-30 апреля 2015 г.	20,07048	-	24,1670	24,0466	30,0557	-	38,8812	34,3938
4 мая 2015 г.	18,4128	23,4043	23,4213	23,3279	28,10588	40,0847	35,9787	31,4109
5 мая	18,5184	23,3551	23,7810	23,6582	28,2301	40,4247	37,4712	32,6575
6 мая	20,8928	23,7584	24,1856	24,0095	31,02283	43,13122	40,5444	35,4099
Май 2015 г.	17,5893	-	23,0742	22,8703	27,1372	-	36,1841	31,2158

Табл. 1. Оценки среднесуточного математического ожидания ПЭС

Оценки состояния ионосферы над Ростовом-на-Дону рассчитывались по глобальным картам полного электронного содержания GIM-TEC Лаборатории JPL (США, формат IONEX) с шагом 2.5° по широте и 5° по долготе (например, [19]) с последующей калибровкой по станции Анапа и модели IRI-2011.

Данные за апрель представлены с разрывом из-за отсутствия наблюдений на станции Терскол с 8 по 20 апреля (после выключения электричества).

Данные за 4-6.05.2015 г. приведены в связи с экспедиционным этапом работ на Кисловодской ГАС ГАО РАН. В последующем приемник был практически не работающим до 1.06.2015 г. Дискретность наблюдений была 1 Гц. Приемник в Апапе проводил зондирование каждые 10 секунд.

По данным табл. 1 можно отметить небольшое увеличение ПЭС над Эльбрусом на фоне данных с Нальчика и Ростова-на-Дону. Небольшое расхождение от этого эффекта над Терсколом и Нальчиком есть только 19.03.2015 г. на фазе обедненной ионосферы после магнитной бури.

Изменение псевдокоординат в апреле начинается с Нальчика. На рис. 7 представлена эмпирическая оценка данных рис. 3 на основе выражения [17-18]:

$$F_{z}=(\Phi_{T}-\Phi_{H})/(<\lambda_{T}>-<\lambda_{H}>)-(L_{T}-L_{H})/(<\phi_{T}>-<\phi_{H}>),$$

где Φ и L – среднесуточные оценки широты и долготы приемников в (т) – Терсколе и в (н) – Нальчике, $\langle \phi \rangle$ и $\langle \lambda \rangle$ – оценки широты и долготы используемых приемников за все время эксперимента: $\langle \phi_{\rm H} \rangle$ =43,469122 град. с.ш., $\langle \lambda_{\rm H} \rangle$ =43,586291 град. в.д., $\langle \phi_{\rm T} \rangle$ =43,274785 град. с.ш., $\langle \lambda_{\rm T} \rangle$ =42,501066 град. в.д. с соответствующими осредненными среднеквадратическими отклонениями: 0,0002438, 0,0001739, 0,0002318, 0,0001584.



Рис. 7. Изменение оценки эмпирического ротора вектора координат приемников с Нальчика на Терскол в марте-мае 2015 г.

Использование в расчетах весовых коэффициентов, обратно пропорциональных среднеквадратическому отклонению каждой среднесуточной оценке псевдопозиционирования [14], не существенно меняет приведенные значения оценок псевдокоординат навигационных приемников.

Уменьшение Fz перед магнитной бурей 17.03.2015 г. повторилось перед Непальским землетрясением. Этот эффект можно интерпретировать как тенденцию поворота вектора от Нальчика до Терскола по часовой стрелке, что соответствует расчетам вблизи от Непальского землетрясения [7].

Перед магнитной бурей тоже проявилась тенденция псевдосближения Нальчика и Терскола в виде небольших всплесков уменьшения разности псевдошироты и увеличения разности псевдодолготы на рис. 3.

Выводы

По результатам расчета псевдокоординат геодезических навигационных приемни-

ков на пике Терскол и в Нальчике в марте-мае 2015 г. по первой рабочей частоте ГНСС ГЛОНАСС/GPS и всем видимым КА ГНСС проявилась активизация вариаций среднесуточных оценок псевдопозиционирования перед магнитной бурей 17.03.2015 г. и перед Непальским землетрясением 25.04.2015 г.

Подготовка сильного землетрясения более длительный процесс. Поэтому рассчитанные оценки псевдосмещений Терскола и Нальчика перед Непальским землетрясением, скорее всего, обусловлены разной динамикой плотности ионосферы и соответствующими ионосферными ошибками.

Активизация изменений псевдокоординат произошла на фоне повышенной плотности ионосферы над Эльбрусом, над которым отмечено небольшое увеличение среднесуточных оценок ПЭС.

В ходе эксперимента отработана технология зондирования ионосферы и геодвижений на основе приема сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

Благодарности. Автор признателен А.Г. Тлатову, В.К. Милюкову и А.П. Миронову за содействие и помощь в проведении экспедиции, Ю.В. Писанко и Ю.К.Калинину за плодотворные дискуссии, а также В.В. Калинникову за помощь в подготовке рис. 5.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00029, № 14-05-10024, № 15-05-10029.

Литература

- Тертышников А.В., Пулинец С.А. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации/ Патент, заявка № 2011128236 от 07.07.2011 на получение патента РФ на изобретение. Бюллетень Изобретения. 2013 № 4. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 01.02.2013.
- 2. Тертышников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO) // Информация и космос. 2010. 1. С. 100-105.
- 3. Глухов Я.В. Программа расчета относительных значений полного электронного содержания по характеристикам ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo. – Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619293, ФИПС, 01.10.2013.
- 4. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Т. 1, 2. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005.
- 5. Кафтан В.И., Краснопёров Р.И., Тертышников А.В. Наблюдения с использованием глобальных навигационных систем на геомагнитных станциях и обсерваториях: прикладные и глобальные аспекты //Гелиогеофизические исследования. 2015. Вып. 12. С. 1-10. http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=298.
- 6. <u>http://www.nasa.gov/jpl/radar-shows-kathmandu-area-uplifted-5-feet-by-gorkha-nepal-earthquake.</u>
- 7. <u>http://www.nasa.gov/jpl/nasa-caltech-team-images-nepal-quake-fault-rupture-surface-movements</u>.
- 8. <u>https://translate.google.ru/translate?hl=ru&sl=en&u=https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/index.php%3Fpage%3Dpppdata&prev=search</u>.
- 9. http://www2.unb.ca/gge/Resources/PPP/OnlinePPPs.html
- Тертышников А.В., Эффект магнитной бури 17.03.2015 г. в полном электронном содержании ионосферы над Эльбрусом//Гелиогеофизические исследования. 2015. Вып. 12. С. 29-33. <u>http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=303.</u>
- 11. Тертышников А.В., Лапшин В.Б., Сыроешкин А.В. и др. Магнитные индексы. Учебное пособие. Москва-Обнинск, 2013. 178 с.
- 12. Тертышников А.В. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических

явлений / <u>http://elibrary.ru/item.asp?id=21273666.</u>

- 13. Калинников В.В., Хуторова О.Г., Тептин Г.М. TropoGNSS (оценка зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн по сигналам ГНСС). Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.- № 2014614454 от 24.04.2014.
- 14. Тертышников А.В. Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений. СПб.: ВИКА, 2000. 304 с.
- 15. Тертышников А.В. Предвестники землетрясений и особенности их регистрации. СПб.:ВИКА. 1996. 128 с.
- 16. Тертышников А.В., Пулинец С.А., Юдин И.А., Карелин А.В., Узунов Д.П., Боярчук К.А. Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера атмосфера ионосфера магнитосфера // Космонавтика и ракетостроение. 2012. 3. С. 21-42.
- 17. Тертышников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Москва, 2013. 261 с.
- 18. Тертышников А.В. Организация прогнозирования природных чрезвычайных ситуаций. Москва, 2013. 268 с.
- 19. http://www.izmiran.ru/services/iweather/storm/.

Results of experimental sounding of navigation receiver coordinates in Nalchik and at peak Terskol in March-May, 2015.

A.V.Tertyshnikov

By the single-frequency method based on the first working frequency and using all visible constellation of GNSS GLONASS/GPS spacecraft calculated are estimates of pseudo-positioning of the geodetic receivers used in experiment in Nalchik and at peak Terskol.

Results of two working frequencies ionosphere sounding over Elbrus and Nalchik with calibration on the IRI-2011 model are given.

Approarch of used in experiment observation points before the Nepalese earthquake on 25.04.2015 is noted due to the different density of the ionosphere.

Keywords: positioning, ionospheric delay, ionosphere, GLONASS, GPS, electron content, receiver, technology, model, geomovements, earthquake, magnetic storm