

10. *Parkinson Bradford W., Spilker James J., Enge Per.* Global Positioning System: Theory and Applications. Volume I. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. – 793 p.

11. *Комаровский Ю. А.* Оценка влияния составляющих магнитного поля Земли на погрешности определения абсолютной скорости судовым приёмником Navstar GPS // Владивосток: Дальнаука, 2004. С 75 – 87. (Тр. УАФО; Т.8, вып.8).

12. *Комаровский Ю. А.* Оценка точности определения координат приёмником СРНС Навстар GPS SPR-1400 // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, Новосибирск, 2007. – С. 61 – 68.

*Ю.А. Комаровский*²

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ НА РАБОТУ СУДОВОГО ОДНОЧАСТОТНОГО ПРИЁМНИКА СИСТЕМЫ НАВСТАР GPS

Немаловажной проблемой применения приёмников спутниковой радионавигационной системы (СРНС) Навстар GPS является подверженность навигационных сигналов спутников влиянию параметров трансионосферного канала распространения и разного рода помех. Наибольший вклад в суммарную погрешность определения координат антенны GPS-приёмника и вектора абсолютной скорости платформы, на которой установлен приёмник, оказывает ионосфера. Её состояние прямо влияет на величину измеряемой псевдодальности от спутника до антенны приёмника. Так как СРНС Навстар GPS относится к дальномерным радионавигационным системам, то величина погрешности определения координат и скорости платформы будет зависеть от того, насколько измеренные приёмником псевдодальности до спутников будут отличаться от геометрических дальностей.

Судовые GPS-приёмники в настоящее время являются одночастотными, измеряющими псевдодальности по дальномерным кодам. Погрешности измерения псевдодальности в судовых приёмниках из-за влияния ионосферы находятся в пределах от дециметра до 50 м [4]. Погрешности зависят от уровня солнечной активности, сезонных и суточных вариаций электронной концентрации в ионосфере, высоты спутника над горизонтом, азимута спутника, геомагнитной широты и долготы платформы [1]. Помимо упомянутых, принятых условно считать регулярными, есть ещё целый ряд погрешностей, называемых нерегулярными. К последним относятся

² Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского.
Владивосток, komarovskiy@msun.ru

те, которые вызываются вспышками на Солнце, сейсмическими событиями, циклонической деятельностью, падением крупных метеоритов и т. д. Эти явления приводят к возмущениям ионосферы и, как следствие, к непредсказуемым и значительным погрешностям определения координат GPS-приёмниками. Перечисленные выше причины возмущения ионосферы носят природный характер. В последние годы объектом исследований стали воздействия всевозможных эпизодических явлений антропогенного характера на состояние ионосферы. Ионосфера заметно модифицируется в результате запусков космических ракет, мощных взрывов при проведении, например, обширных вскрышных работ, зондирования мощными импульсами электромагнитной энергии и т. д.

Годовые, сезонные и суточные вариации параметров ионосферы носят глобальный характер. Геомагнитные возмущения в результате вспышек на Солнце также вызывают повсеместную модификацию ионосферы, хотя и не одинаковой интенсивности. Циклоническая деятельность и сейсмические события уже не носят характер глобального воздействия на ионосферу. Падение крупных метеоритов, а также воздействия эпизодических явлений антропогенной природы приводит к возникновению модифицированных областей ионосферы достаточно малых размеров, что сильно ограничивает возможности детектирования таких явлений с помощью

GPS-мониторинга. Цель данной работы заключается в попытке оценить вклад локального возмущения ионосферы в погрешности определения обсервованных геодезических координат, вызванного событием антропогенной природы 9 октября 2006 года в месте с координатами $41^{\circ}16'50''N$, $129^{\circ}09'49''E$.

Это событие, сопровождавшееся мощным импульсом электромагнитной энергии, совпало с длительными экспериментальными наблюдениями автора за работой неподвижного судового GPS-приёмника GP-37, установленного вблизи пункта «Владивосток» фундаментальной астрономо-геодезической сети. Абсолютные координаты антенны приёмника в системе геодезических координат WGS-84 были получены в результате привязки к координатам пункта с помощью теодолита ЗТ5КП, что позволило в дальнейшем исследовать суточный ход абсолютных смещений. В ходе экспери-

ментальных наблюдений каждую секунду на жёсткий диск ноутбука автоматически записывались данные в формате NMEA 0183, содержащие геодезическую широту, долготу и возвышение антенны приёмника над поверхностью геоида.

Так как упомянутое событие произошло в 1 час 35 минут 27 секунд по шкале Универсального координированного времени (UTC), то было принято решение проанализировать ход отклонений обсервованных координат в метрах с 1 часа 35 минут по 1 час 36 минут 9.10.2006 года. Графики абсолютных отклонений координат за эту минуту наблюдений представлены на рис. 1.

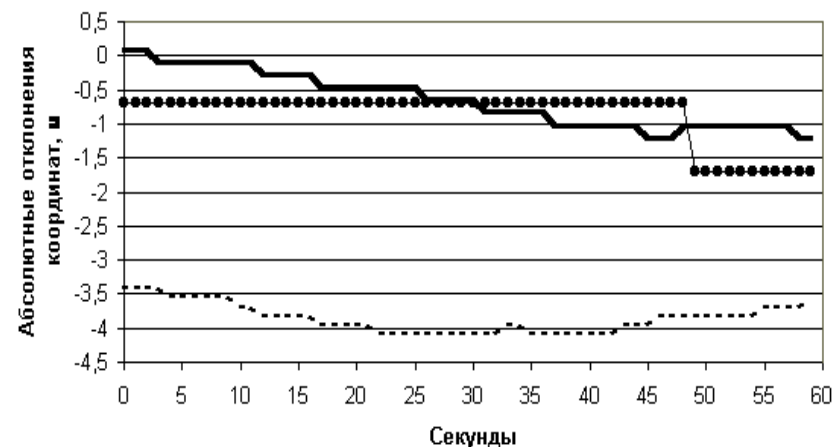


Рис. 1. Графики абсолютных отклонений координат за 36-ю минуту наблюдений (сплошная линия – отклонения широты, пунктирная линия – отклонения долготы, маркеры – отклонения возвышения антенны)

Как можно убедиться, явных признаков бросков координат в 27-ю секунду наблюдений не прослеживается. Следовательно, можно предположить, что, либо мощность импульса электромагнитной энергии в месте установки антенны GPS-приёмника была слишком мала, чтобы раскачать входную часть приёмника, либо входная часть приёмника смогла отфильтровать его как помеху, либо такого импульса не было вовсе. В работе [2] было показано, что широкополосная радиопомеха, создаваемая электросварочными

работами даже вблизи антенны одночастотного приёмника СРНС Навстар GPS, не создаёт помех и, как следствие, не вызывает дополнительных погрешностей в обсервованных координатах.

Сильное электромагнитное возмущение над местом его источника неизбежно создаёт модифицированную область ионосферы [3]. Это приводит к нарушению пространственно-временного хода максимума электронной концентрации в слое F2, что вызывает дополнительные погрешности измерения GPS-приёмником псевдодальностей. Поэтому дальнейшие исследования влияния импульса электромагнитной энергии сосредоточились на том, как изменялся суточный ход обсервованных координат приёмника GP-37 9-го октября по сравнению с предыдущими двумя сутками. Для этого с 1 часа до 24 часов по шкале UTC за 7-е, 8-е и 9-е октября были рассчитаны средние значения широты (φ_{cp}), долготы (λ_{cp}) и возвышение антенны (h_{cp}) за каждую 1 минуту наблюдений. За каждые сутки таким образом было получено 1379 значений φ_{cp} , λ_{cp} и h_{cp} . Далее вычислялись средние квадратические отклонения (СКО) координат и абсолютные отклонения средних координат ($\Delta\varphi_{cp}$, $\Delta\lambda_{cp}$, Δh_{cp}) от точного места антенны в метрах.

При расчётах показателей суточного хода геодезических широт применялись следующие формулы:

$$\varphi'_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{60} \varphi'_i}{60}, \quad \Delta\varphi_{cp} = (\varphi'_0 - \varphi'_{cp}) \times l_m, \quad СКО\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{60} (\varphi'_i - \varphi'_{cp})^2}{60}} \times l_m,$$

где φ'_{cp} – среднее значение обсервованных геодезических широт за 1 минуту наблюдений, выраженное в угловых минутах; i – номер секунды в одноминутном интервале измерения; $\Delta\varphi_{cp}$ – абсолютное отклонение средней за одноминутный интервал наблюдений обсервованной широты в м; φ'_0 – точное значение широты антенны приёмника; выраженное в угловых минутах; l_m – длина одной минуты меридиана в широте φ'_0 ; в данном случае $l_m = 1851,662421$

м; $СКО\varphi$ – среднее квадратическое отклонение геодезической широты, выраженное в метрах.

По полученным данным были построены графики абсолютных отклонений средних за 1 минуту наблюдений широт и СКО широт за 7-е, 8-е и 9-е октября 2006 года. Визуальный анализ этих графиков не позволил сделать однозначный вывод о существенном отличии изменения средних широт 9-го октября от предыдущих суток. Было видно, что характерные изгибы средних абсолютных отклонений повторяются на всех трёх графиках. Иными словами, характер суточного хода средних абсолютных отклонений широт остаётся практически неизменным. Поэтому для объективного сравнения изменений абсолютных отклонений средних широт и их СКО они были представлены в виде случайных величин. Статистические характеристики этих случайных величин по каждому дню наблюдений сведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики абсолютных отклонений широт и СКО широт

Характеристика	Абсолютное отклонение			СКО		
	7.10.2006	8.10.2006	9.10.2006	7.10.2006	8.10.2006	9.10.2006
Минимум, м	-4,74	-3,46	-3,46	0	0	0
Максимум, м	4,08	4,43	6,20	1,58	1,05	1,33
Размах, м	8,82	7,89	10,44	1,58	1,05	1,33
Среднее, м	-0,11	-0,33	-0,02	0,25	0,25	0,25
Сигма, м	1,13	1,08	1,15	0,14	0,14	0,14

Из табл. 1 следует, что среднее за сутки абсолютное отклонение широты за 9-е октября было минимальным, а размах варьирования и стандартное отклонение – максимальны. Накануне, 8-го

октября, среднее отклонение оказалось самым большим. Этот факт следует интерпретировать как предвестник землетрясения, которое произошло вскоре после события 9-го октября 2006 года. Подобные явления описаны в работе [3].

О характере распределения средних абсолютных отклонений и СКО как случайных величин можно судить по полигонам частот. Полигоном частот является ломаная линия, соединяющая точки, соответствующие подсчитанным частотам вариантов. На рис. 2 и 3 представлены полигоны частот средних за 1 минуту абсолютных отклонений широт и рассчитанные за 1 минуту СКО абсолютных отклонений широт.

На рис. 2 видно, что характер распределений средних абсолютных отклонений меняется от суток к суткам. Причём распределение частот 8 октября заметно отличается от других. Полигоны частот СКО остаются практически неизменными, в чём можно убедиться на рис. 3. На нём ломаные линии сливаются. Отсюда можно сделать вывод о том, что процессы, происходящие в ионосфере, в большей степени влияют на абсолютные отклонения обсервованных широт, но не влияют на случайные погрешности измерений, характеристикой которых здесь принято среднее квадратическое отклонение, рассчитанное за одну минуту наблюдений. Характер суточного хода средних абсолютных отклонений широт остаётся практически неизменным.

Абсолютные отклонения геодезических долгот и их СКО рассчитаны по таким же формулам, в которых длина одной минуты параллели равнялась 1351,064347 м. Статистические характеристики абсолютных отклонений долготы и СКО долготы, принимаемых в качестве случайных величин, по каждому дню наблюдений сведены в табл. 2.

Более полное представление о характере распределения абсолютных погрешностей долготы и СКО долготы дают полигоны частот рис. 4 и 5. На рис. 4 видно, что характер распределений средних абсолютных отклонений долготы существенно меняется от суток к суткам, в то время как полигоны частот СКО на рис. 5 остаются практически неизменными.



Рис. 2. Полигоны частот средних абсолютных отклонений широты за 7 октября (пунктирная линия), за 8 октября (тонкая линия с маркером) и за 9 октября (жирная линия)



Рис. 3. Полигоны частот СКО абсолютных отклонений широты за 7 октября (пунктирная линия), за 8 октября (тонкая линия с маркером) и за 9 октября (жирная линия)

Таблица 2
Статистические характеристики абсолютных отклонений долгот и СКО долгот

Характеристика	Абсолютное отклонение			СКО		
	7.10.2006	8.10.2006	9.10.2006	7.10.2006	8.10.2006	9.10.2006
Минимум, м	-4,59	-4,75	-4,06	0,02	0,02	0,03
Максимум, м	1,67	1,65	2,11	1,07	0,79	0,74
Размах, м	6,27	6,4	6,17	1,05	0,77	0,71
Среднее, м	-1,13	-1,31	-1,1	0,19	0,19	0,19
Сигма, м	0,92	1,01	0,86	0,1	0,09	0,1

Если сравнить между собой статистические характеристики абсолютных погрешностей широт и долгот, а также полигоны частот рис. 2 и 4, то можно сделать следующие выводы. Средние абсолютные отклонения широты и долготы максимальны 8-го октября, но не 9-го. Средняя квадратическая погрешность (сигма) абсолютных отклонений широты максимальна 9-го октября. Сигма средних абсолютных отклонений долготы 9-го октября гораздо меньше сигмы широты. Следовательно, если 9-го октября имел место мощный импульс электромагнитной энергии, то вызванная им модификация ионосферы уменьшила дисперсию средних абсолютных отклонений долгот, а дисперсию средних абсолютных отклонений широт увеличила. Статистические характеристики СКО абсолютных отклонений широт и долгот практически не изменялись за весь период наблюдений. Средние значения СКО абсолютных отклонений широт существенно больше. Поэтому этот параметр не целесообразно применять в качестве критерия для анализа динамики суточных изменений, наблюдаемых с помощью одночастотных приёмников СРНС Навстар GPS широт и долгот.



Рис. 4. Полигоны частот средних абсолютных отклонений долготы за 7 октября (пунктирная линия), за 8 октября (тонкая линия с маркером) и за 9 октября (жирная линия)



Рис. 5. Полигоны частот СКО абсолютных отклонений долготы за 7 октября (пунктирная линия), за 8 октября (тонкая линия с маркером) и за 9 октября (жирная линия)

Таблица 3

Статистические характеристики абсолютных отклонений возвыше-
ний антенны над референц-эллипсоидом и СКО возвышений

Характеристика	Абсолютное отклонение			СКО		
	7.10.2006	8.10.2006	9.10.2006	7.10.2006	8.10.2006	9.10.2006
Минимум, м	-5,419	-5,619	-5,703	0	0	0
Максимум, м	9,913	8,297	9,063	1,708	1,575	1,511
Размах, м	15,333	13,916	14,766	1,708	1,575	1,511
Среднее, м	0,934	0,424	0,885	0,299	0,296	0,317
Сигма, м	2,252	2,469	2,345	0,281	0,280	0,284

В более ранних работах автора было показано, что наибольшей вариабельностью обладает третья координата – возвышение антенны приёмника над референц-эллипсоидом. Поэтому завершить исследования целесообразно анализом характеристик изменения возвышения антенны в день события и сравнить их с характеристиками предшествующих суток.

Судовой одночастотный приёмник СРНС Навстар GPS вычисляет и выводит на внешние устройства предложением \$GPGGA стандарта NMEA 0183 возвышение антенны над геоидом (h_i) в метрах и отстояние поверхности геоида от поверхности референц-эллипсоида WGS 84 (h_g) в метрах в точке с данными геодезическими координатами. Поэтому среднее за одну минуту возвышение антенны над геоидом (h_{cp}), среднее абсолютное отклонение возвышения антенны (Δh_{cp}) над референц-эллипсоидом и СКО h вычислялись по следующим формулам:

$$h_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{60} h_i}{60}, \Delta h_{cp} = (h_0 + h_g) - h_{cp}, CКО_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{60} (h_i - h_{cp})^2}{60}},$$

где h_0 – точное значение возвышения фазового центра антенны приёмника GP-37 над поверхностью референц-эллипсоида WGS 84 для фундаментального пункта “Владивосток” во время наблюдений. Статистические характеристики абсолютных отклонений средних возвышений антенны и СКО возвышений, принимаемых в качестве случайных величин, по каждому дню наблюдений сведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что минимальное среднее абсолютное отклонение возвышения антенны имело место 8-го октября (0,424 м). Для этого дня сигма была максимальной. Среднее СКО 9-го октября было максимально (0,317 м), но дисперсия СКО оставалась практически постоянной.

Сравнение полигонов средних абсолютных отклонений возвышений антенны на рис. 6 подтверждает факт начала возмущения ионосферы 8-го октября, но не 9-го, когда произошло событие, сопровождавшееся мощным импульсом электромагнитной энергии.



Рис. 6. Полигоны частот средних абсолютных отклонений возвышений антенны над поверхностью референц-эллипсоида за 7 октября (пунктирная линия), за 8 октября (тонкая линия с маркером) и за 9 октября (жирная линия)

Здесь надо особо отметить более высокую чувствительность измеряемых GPS-приёмником возвышений антенны к происходящим процессам в ионосфере по сравнению с измеряемыми широтами и долготами.

Подводя итог проделанному анализу, можно сформулировать следующие заключения.

1. Задолго до события 9-го октября происходила модификация ионосферы, причинами которой, скорее всего, были сейсмогенные эффекты, развивавшиеся вблизи места источника электромагнитного импульса.

2. На фоне аномальной пространственно-временной изменчивости ионосферы, начало которой приходится на 8-е октября, затруднительно однозначно детектировать явления модификации ионосферы, вызванные мощным импульсом электромагнитной энергии, с помощью анализа вариабельности геодезических координат, определяемых одночастотным GPS-приёмником.

3. Использование модели разогрева ионосферы одиночным мощным широкополосным электромагнитным импульсом в данном случае затруднительно, так как вариации обсервованных геодезических координат являются для неё косвенными аргументами. Более того, вполне возможно, что событие 9-го октября имело иную физическую природу, нежели объявленную.

4. Полученные результаты могут служить основанием для создания сети мониторинга ионосферных возмущений, обусловленных предвестниками сейсмогенных эффектов, на базе недорогих одночастотных GPS-приёмников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казанцев М. Ю., Фатеев Ю. Л. Определение ионосферной погрешности измерения псевдодальностей в одночастотной аппаратуре систем Глонасс и GPS // Электронный журнал радиоэлектроники, РАН, № 12, 2002, 8 с.

2. Комаровский Ю. А. Оценка влияния промышленных помех на точность определения места судна в ходе выполнения операций ЛАРН // Вестник МГУ им. адм. Г. И. Невельского, серия Теория и практика защиты моря (3/2004), Владивосток, 2004. С. 3 – 12.

3. Бондур В. Г., Смирнов В. М. Ионосферные возмущения в период подготовки сейсмических событий по данным спутниковых навигационных систем // Со-

временные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов, ИКИ РАН. Сборник научных статей. Выпуск 3. Том II – М.: ООО “Азбука-2000”, 2006. С. 190 – 198.

4. Hoffmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. Springer-Verlag. Wien, New York, 1994, 356 p.