

*Ю.А. Комаровский**

**ПОГРЕШНОСТИ КООРДИНАТ ПРИЁМНИКА
GARMIN GPS-128 ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ
29-31 ОКТЯБРЯ 2003 ГОДА**

Работа любого GPS-приёмника во время действия магнитной бури сопровождается неизбежным ухудшением точности определения координат. Происходит это из-за возмущений в ионосфере. Точность измерения псевдодальности до спутника зависит от концентрации электронов вдоль трассы “спутник-антенна”. Вариации полного электронного содержания (ПЭС) и локальных электронных концентраций по направлению на каждый спутник системы GPS вызывают смещения обсервованных координат.

С позиции современного представления о динамике неоднородностей электронных концентраций структура ионосферы является результатом наложения процессов разной природы, масштабов и перемещений в околоземном пространстве. С увеличением возмущённости магнитного поля Земли растёт амплитуда вариаций ПЭС. Амплитуда вариаций ПЭС во время сильной магнитной бури может составлять до 50 % от фонового значения [1].

Когда действуют сильные магнитные бури, то происходят значительные изменения крупномасштабных, среднемасштабных и мелкомасштабных возмущений. Наиболее значительно возмущается ионосферная плазма в авроральной ($65^\circ - 90^\circ$ широты) и экваториальной ($0^\circ - 20^\circ$ широты) областях. На работу приёмников системы GPS, находящихся в средних широтах, влияние магнитных бурь ослабляется. Воздействие магнитной бури на распространение сигналов спутников по каждой трассе “спутник-антенна” сугубо индивидуально и зависит не только от географических координат приёмни-

ка, но и от местного времени наблюдений, месяца года, фазы солнечной активности, времени начала бури, характера возмущения магнитного поля Земли и предбуревой активности Солнца.

Магнитные бури оказывают различное влияние на работу GPS-приёмников разного типа. У приёмников, измеряющих радионавигационный параметр фазовым способом, во время действия магнитной бури не только снижается точность определения координат, но также происходят срывы сопровождения фазы сигнала, что приводит к прекращению нормального функционирования приёмника.

Во время сильной магнитной бури 29-31 октября 2003 года двухчастотные геодезические приёмники с фазовыми измерениями псевдорасстояний имели погрешности определения координат (1σ) до двух сотен метров и более. В эти дни на северо-востоке США максимальная погрешность достигала 200 – 220 м, на юго-западе США она доходила до 70 – 180 м. В Европе погрешность колебалась от 180 м до 300 м в зависимости от типа приёмника. В Восточной Сибири погрешность определения координат отмечалась на уровне 180 – 250 м [1].

На морских судах эксплуатируются одночастотные GPS-приёмники с кодовым измерением радионавигационного параметра. Представителем такого типа приёмников является GPS-128, изготавливаемый американской компанией Garmin. Так как на современных судах одновременно эксплуатируется 2-3 GPS-приёмника, то, как правило, GPS-128 используется в качестве дополнительного. На малых судах он устанавливается как основной GPS-приёмник.

Приёмник Garmin GPS-128 определяет обсервованные геодезические широты и долготы с разрядностью трёх знаков после запятой угловой минуты, а возвышения фазового центра антенны над уровнем геоида с разрядностью одного знака после запятой метра. Обновление координат на экране и на выходе COM-порта выполняется через каждые две секунды.

В октябре и в ноябре 2003 года в лаборатории спутниковых технологий и мониторинга института защиты моря Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского велась непрерывная круглосуточная запись данных с приёмника Garmin GPS-128

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

на жёсткий диск персонального компьютера. Полученные в ходе наблюдений обсервованные координаты в системе WGS-84 послужили количественной основой для анализа влияния сильной магнитной бури 29-31 октября 2003 года. Анализ проводился с целью обнаружения воздействия геомагнитной возмущённости на ход обсервованных координат и оценки возникающих при этом их погрешностей. Такого исследования одночастотных GPS-приёмников с кодовым измерением псевдодалности ещё не проводилось.

Предполагалось, что во время магнитной бури координаты приёмника GPS-128 будут смещаться и значительно флуктуировать. Для проверки этого предположения был изучен период времени с 0 часов UTC 28 октября по 24 часа UTC 1 ноября 2003 года. Наблюдения за 28 октября были взяты для исследования, чтобы оценить влияние мощной солнечной вспышки. Наблюдения, полученные 1 ноября, служили получению статистических параметров в качестве опорных для сравнения, так как эти сутки считаются магнитоспокойными.

Сначала весь исследуемый период был разбит на 3-минутные смежные интервалы. В каждом таком интервале было 90 зарегистрированных широт, долгот и возвышений антенны. Затем по каждому 3-минутному интервалу рассчитывались средние значения широты φ , долготы λ в минутах и возвышения антенны h в метрах, а также средние квадратические погрешности (СКП) σ этих координат в метрах по следующим формулам:

$$\varphi_{\text{cp}} = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} \varphi_i, \quad \lambda_{\text{cp}} = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} \lambda_i, \quad h_{\text{cp}} = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{90} h_i,$$

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{90} (\varphi_i - \varphi_{\text{cp}})^2}{90}} \times l_m, \quad \sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{90} (\lambda_i - \lambda_{\text{cp}})^2}{90}} \times l_p, \quad \sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{90} (h_i - h_{\text{cp}})^2}{90}},$$

где l_m, l_p – длины дуг одной минуты меридиана и параллели в метрах. Для места наблюдений во Владивостоке $l_m = 1851,6624$ м, $l_p = 1351,0643$ м.

Графики изменения осреднённых за 3 минуты координат (левые панели) и их СКП (правые панели) представлены на рис. 1-3.

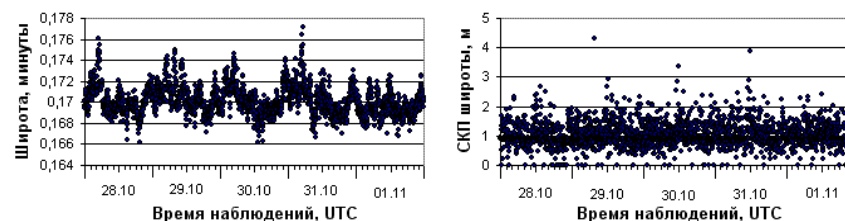


Рис. 1. Характер изменения осреднённой за 3 минуты широты и СКП широты

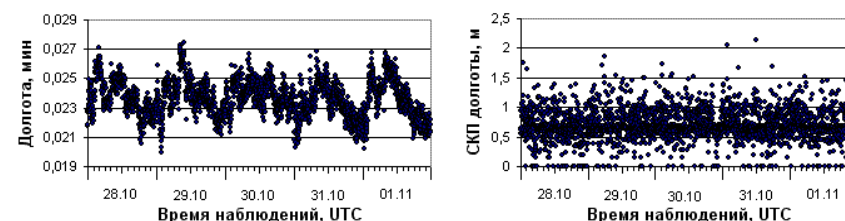


Рис. 2. Характер изменения осреднённой за 3 минуты долготы и СКП долготы

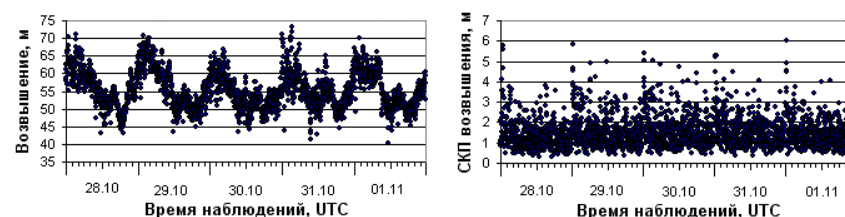


Рис. 3. Характер изменения осреднённого за 3 минуты возвышения и СКП возвышения

На графиках левых панелей видно, как на почти регулярный суточный ход осреднённых координат накладываются всплески абсолютных отклонений, вызванных магнитной бурей. Начало магнитной бури приходится на 6:10 29 октября. На рис. 1 и 2 можно видеть, что на этот момент времени приходятся значительные откло-

нения широты к северу и долготы к востоку. Заметного отклика возвышения антенны на рис. 3 не наблюдается. Влияние развития магнитной бури на регистрируемую широту и долготу можно более детально проследить на рис. 4.

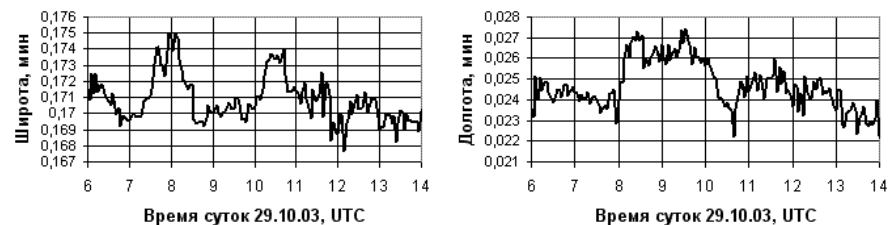


Рис. 4. Развитие магнитной бури 29 октября 2003 года

На графиках рис. 4 можно видеть, что в 6:10 начались заметные флуктуации осреднённых широт и осреднённых долгот. На моменты времени 8 и 10:30 приходятся пиковые значения средних широт и долгот. В эти моменты времени средняя широта отклонилась к северу почти на 11 метров. Средняя долгота между 8 часами и 10:30 дрейфовала к западу на 5,9 метров.

Если продолжать сравнивать левые панели рис. 1 и 2, то можно заметить, что наибольшие отклонения средняя широта и среднее возвышения антенны имели место 31 октября. Чтобы оценить параметры варьирования обсервованной широты и долготы в этот день, были рассчитаны такие же статистические характеристики широты и долготы за 1 ноября 2003 года. В этот день магнитная буря не проявлялась. Результаты вычислений сведены в табл. 1.

Из таблицы 1 следует, что среднее значение широты, полученное за все сутки 31 октября, отстоит к северу на 1,41 м по отношению к средней широте, полученной за магнитоспокойные сутки 1 ноября. Среднее значение долготы за 31 октября отстоит на 0,38 м к западу. СКП широты в магнитную бурю на 1 м больше СКП широты в магнитоспокойный день 1 ноября. Видно, что СКП долготы 31 октября на 0,24 м меньше СКП долготы 1 ноября. Этот факт следует интерпретировать как подтверждение меньшей зависимости долготы от возмущений в ионосфере в магнитную бурю. После окончания магнитной бури размах варьирования широты уменьшился на 5,6 м,

а долготы на 1,4 м. Заметно уменьшилась асимметрия широты, но не долготы. Сохранился вид эмпирического закона распределения долготы, что подтверждается отрицательными эксцессами.

Таблица 1

Статистические характеристики вариаций абсолютных значений широт и долгот за 31.10.03 и за 1.11.03

Характеристика	31 октября 2003 года		1 ноября 2003 года	
	Широта	Долгота	Широта	Долгота
Среднее значение, мин	0,17025	0,02325	0,16949	0,02353
СКП, м	3,16	1,82	2,17	2,06
Асимметрия	0,59	0,07	0,40	0,09
Эксцесс	0,86	-0,28	0,44	-0,70
Макс. значение, мин	0,178	0,028	0,174	0,027
Мин. значений, мин	0,166	0,019	0,165	0,019
Размах варьирования, м	22,22	12,16	16,66	10,81

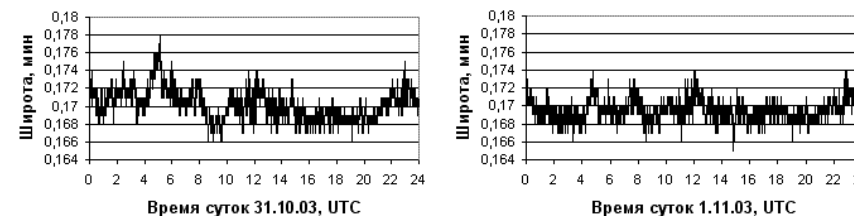


Рис. 5. Суточный ход абсолютного значения широты 31.10.03 и 1.11.03

Если сравнить суточный ход абсолютного значения широты за 31 октября с ходом широты 1 ноября (рис. 5), то можно сделать вывод о сохранении характера изменения этой координаты. Только в магнитную бурю амплитуды характерных отклонений заметно выше. Как видно на рис 5, на 5 часов приходится всплеск значения зарегистрированной абсолютной широты. 31 октября этот всплеск на 3,7 м выше, нежели 1 ноября. Если сравнить графики рис. 5, то можно сделать вывод о прекращении действия магнитной бури приблизительно в 12 часов UTC.

Об изменении вида эмпирических законов распределения абсолютных широт и долгот после прекращения действия магнитной бури можно также судить по гистограммам на рис. 6 и 7. Видно, что в магнитоспокойный день частоты абсолютных значений широт гораздо компактнее располагаются вблизи моды.

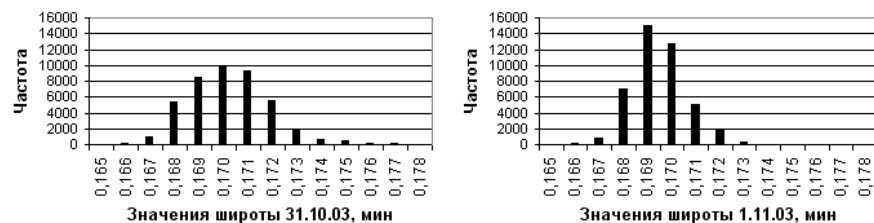


Рис. 6. Гистограммы распределений широт 31.10.03 и 1.11.03

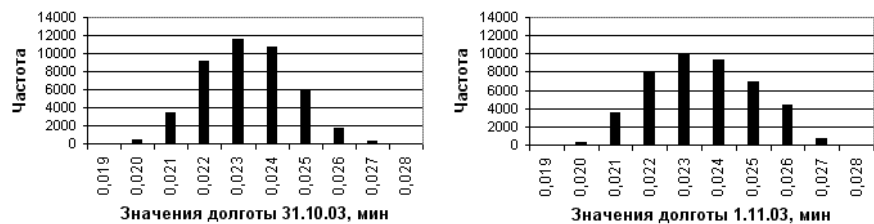


Рис. 7. Гистограммы распределений долгот 31.10.03 и 1.11.03

Правые панели рис. 1-3 дают представление об изменениях СКП широт, долгот и возвышений антенны, рассчитанных за последовательные 3-минутные интервалы. Видно, что СКП широты и долготы довольно часто даже в дни магнитной бури принимают нулевые значения. Этот факт следует рассматривать как отсутствие высокочастотных составляющих в спектре флуктуаций широты и долготы во время действия магнитной бури. СКП возвышения антенны никогда не принимала значение, равное нулю. Заметно, что наибольшие значения СКП координат приходятся на дни магнитной бури.

Для сравнения между собой случайных составляющих вариаций координат во время действия магнитной бури (с 29 октября по 31 октября) примем рассчитанные СКП в качестве случайных величин. Их статистические характеристики сведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистические характеристики СКП координат в магнитную бурю

Статистическая характеристика	СКП широты	СКП долготы	СКП возвышения
Среднее значение СКП, м	1,064	0,718	1,578
Среднее квадратическое отклонение, м	0,430	0,266	0,811
Асимметрия	1,183	0,359	1,540
Экцесс	5,053	2,365	3,10
Максимальное значение СКП, м	4,331	2,133	5,829
Минимальное значение СКП, м	0	0	0,368
Размах варьирования СКП, м	4,331	2,133	5,461

Из табл. 2 следует, что наибольшее СКП у возвышения антенны, а меньшее – у долготы. Лучше всего группируются у своего среднего значения СКП долготы, так как у них наименьшее среднее квадратическое отклонение и асимметрия. Наибольшие максимальные отклонения СКП наблюдаются у возвышения антенны над геоидом.

Существенные нерегулярные колебания ПЭС во время магнитных бурь вызывают возникновение в верхней атмосфере Земли разного рода неоднородностей, что приводит к рассеиванию радиосигналов от спутников системы GPS. Поэтому на входе GPS-приёмника могут наблюдаться существенные изменения амплитуды сигнала, что порой приводит к срыву его сопровождения и в конечном итоге – к сбою в работе приёмника. Как следует из работы [2], в периоды геомагнитных возмущений суточное количество сбоев двухчастотных приёмников с фазовым измерением радионавигационного параметра может достигать 120. За время наблюдений за работой приёмника Garmin GPS-128 с 28 октября по 1 ноября не было

А.П. Крамынин, Г.П. Воробьева

СРАВНЕНИЕ РЯДОВ ПЛОЩАДЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ФАКЕЛОВ УАФО И ГАС ГАО

зарегистрировано ни одного сбоя сопровождения. Из этого факта не следует делать однозначного вывода об устойчивости GPS-приёмников с кодовыми измерениями к воздействию магнитных бурь. В статье [3] показано увеличение сбоев в работе судового GPS-приёмника SPR-1400 во время сравнительно слабой магнитной бури.

В заключении, подводя итоги проделанному анализу, надо отметить следующее.

1. Магнитная буря 29-31 октября 2003 года не изменила характера суточного хода абсолютных погрешностей координат судового приёмника GPS-128. Отмечены только увеличения амплитуд абсолютных отклонений.

2. Из плановых координат наиболее чувствительной к воздействию геомагнитных возмущений оказалась широта. Она сместилась на 11 м к северу, в то время как долгота дрейфовала к западу почти на 6 м. СКП широты в магнитную бурю становилась на 1 м больше по сравнению с магнитоспокойными сутками. СКП долготы практически не изменялась.

3. Наибольшее воздействие магнитная буря оказала на повышение антенны над геоидом.

4. Судовой одночастотный приёмник GPS-128 не имел сбоев в работе с 28 октября по 1 ноября 2003 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афраймович Э.Л., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.

2. *Демьянов В.В., Афраймович Э.Л., Кондакова Т.Н.* Ухудшение качества функционирования навигационной системы GPS в условиях геомагнитной возмущённости // Солнечно-земная физика. Вып. 3, 2003. С. 86 – 94.

3. *Комаровский Ю.А.* Оценка погрешностей определения координат судовым GPS-приёмником SPR-1400 во время магнитной бури 15 декабря 2006 года // Солнечная активность и её влияние на Землю. Труды УАФО; т. 11, вып. 11. – Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 52 – 72.

Наблюдения Солнца в УАФО ведутся с 1954 года. За этот период накоплен достаточно обширный ряд данных по индексам солнечной активности: числам Вольфа, площадям пятен, факелов и т.д. Но, по не зависящим от наблюдателей причинам (погодным, техническим), полученные ряды данных являются не полными, что затрудняет их использование для дальнейшего анализа. Для пополнения рядов солнечных данных, полученных в УАФО, можно попробовать воспользоваться наблюдательными данными какой-либо другой обсерватории, регистрирующей такие же индексы солнечной активности. В этом случае необходимо проанализировать переход от одной системы рядов наблюдений к другой.

Настоящая статья посвящена анализу рядов площадей солнечных факелов, полученных в Уссурийской астрофизической обсерватории и Кисловодской горной астрономической станции ГАО. Ранее проводились сравнения разных индексов солнечной активности, в частности площадей групп пятен Пулковской и Гринвичской обсерваторий [1], потока радиоизлучения на частоте 2,80 ГГц получаемого в УАФО, с данными мировой сети [4], чисел Вольфа по данным УАФО с числами Вольфа по данным журнала SGD [2]. В нашем случае необходимо ответить на вопросы: 1) каково соотношение площадей солнечных факелов, полученных в УАФО и ГАС ГАО и 2) насколько оно постоянно, т.е. насколько устойчивы системы площадей факелов.

Для анализа использовались ежедневные значения суммарной площади фотосферных факелов для всего диска Солнца в целом. Рассматривались ряды наблюдений площадей фотосферных факелов Уссурийской астрофизической обсерватории и Горной астрономической станции ГАО за период 1955–1982, 1990–1992, 1994–2007. Регулярные наблюдения фотосферы Солнца по программе Службы