

УДК 528.2:550.341:550.24

ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ GPS В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ

© 2021 г. А. А. Спивак¹, *, С. А. Рябова¹, Ю. С. Рыбнов¹, В. А. Харламов¹

Представлено академиком РАН В.В. Адушкиным 15.04.2021 г.

Поступило 13.05.2021 г.

После доработки 02.07.2021 г.

Принято к публикации 05.07.2021 г.

Приведены результаты анализа данных инструментальных наблюдений за вариациями ошибки определения координат навигационной спутниковой системой GPS, выполненных в Геофизической обсерватории “Михнево” ИДГ РАН в периоды магнитных бурь. На примере 50 событий, произошедших в период 2016–2019 гг., показано, что магнитные бури (индекс геомагнитной активности $K_p \geq 5$) вызывают заметное увеличение ошибки позиционирования GPS. Полученные данные могут быть использованы при рассмотрении ошибки позиционирования в качестве индикатора возмущенного состояния ионосферы и атмосферы при магнитных бурях, а также параметра, характеризующего степень возмущения среды и условия распространения GPS-сигналов.

Ключевые слова: GPS, магнитная буря, координатные данные, ошибка позиционирования

DOI: 10.31857/S2686739721100169

Широкое использование глобальной навигационной спутниковой системы GPS при решении практических задач и в ходе выполнения фундаментальных научных исследований вызывает необходимость оценки ошибки позиционирования. Это особенно важно при определении координат в геодезии, картографии, воздушной и наземной навигации, определении смещений земной коры, выделении собственных колебаний Земли, а также позиционировании измерительной аппаратуры [1–3]. В последнее время данные глобальной спутниковой системы позиционирования успешно используются при мониторинге состояния ионосферы и атмосферы, а также при тестировании каналов распространения радиосигналов [4, 5]. Надежность и точность координатных данных, получаемых на основе GPS, определяются не только шумами в системе глобального позиционирования (неточность эфемеридных данных, собственные шумы приемника, помехи выборочной доступности и т.д.), но также влиянием геофизической среды вдоль трассы распространения спутникового сигнала на его характеристики (ионосферная и тропосферная рефракция, наличие отраженных сигналов и т.д.). Наряду с этим на ошибку позиционирования мо-

гут также влиять явления и процессы природного и техногенного происхождения [1, 6–8].

Современные средства регистрации и методы обработки спутниковых сигналов позволяют существенно уменьшить ошибки позиционирования. В частности, например, с целью уменьшения влияния ионосферы применяется двухчастотный режим приема и обработки полезных сигналов. Вместе с тем ошибка определения координат может рассматриваться в качестве потенциально возможного параметра, характеризующего состояние и степень возмущения среды (ионосферы и атмосферы) вдоль трассы распространения GPS-сигнала.

Среди явлений природного происхождения, которые могут влиять на величину ошибки определения координат, особый интерес представляют сильные геомагнитные вариации в виде магнитных бурь.

В настоящей работе анализируется влияние магнитных бурь на величину ошибки позиционирования навигационной спутниковой системы GPS.

В качестве исходных данных нами использованы данные, полученные в результате регистрации координат GPS приемником Javad Sigma-G3T, расположенным на территории геофизической обсерватории “Михнево” (ГФО МНВ) ИДГ РАН (54.959° с.ш.; 37.766° в.д.). Антенна GPS-приемника располагалась на мачте высотой 8 м, удаленной на расстояние не менее 12 м от ближайшей лесной растительности. В результате измерений

¹ Институт динамики геосфер имени М.А. Садовского
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: aaspivak100@gmail.com

Таблица 1. Перечень магнитных бурь

№ п/п	Дата	UTC	K	K_p	B_0 , нТл	E^* , м	№ п/п	Дата	UTC	K	K_p	B_0 , нТл	E^* , м
1	21.01.2016	15–18	5	6	70	6	26	31.03.2017	15–18	5	5	60	9
2	24.02.2016	15–24	5	5	35	23	27	01.04.2017	15–18	5	4	30	4
3	06.03.2016	18–24	5	6	105	5	28	22.04.2017	15–18	6	6	100	15
4	07.03.2016	18–24	5	5	65	5	29	23.04.2017	12–15	5	5	75	22
5	11.03.2016	12–15	5	5	50	12	30	03.06.2017	15–18	5	5	40	14
6	12.04.2016	09–12	6	5	40	8	31	17.07.2017	15–18	5	6	60	8
7	05.06.2016	12–15	5	5	75	6	32	31.08.2017	12–15	5	5	50	22
8	29.09.2016	15–18	6	5	105	19	33	08.09.2017	12–15	7	8	200	18
9	30.09.2016	18–21	6	5	122	12	34	14.09.2017	15–18	5	5	40	15
10	13.10.2016	15–21	6	6	65	7	35	30.09.2017	12–15	5	5	80	23
11	25.10.2016	12–18	7	6	80	20	36	13.10.2017	12–15	5	6	20	23
12	27.10.2016	15–18	5	5	70	16	37	24.10.2017	12–18	6	5	45	20
13	24.11.2016	12–15	5	5	35	4	38	08.11.2017	12–15	6	6	40	22
14	25.11.2016	15–18	5	5	70	7	39	21.11.2017	15–18	5	5	80	4
15	07.12.2016	18–21	5	5	90	6	40	05.12.2017	12–18	5	5	60	12
16	08.12.2016	15–21	5	5	45	7	41	12.12.2017	18–21	5	5	45	5
17	09.12.2016	18–21	5	5	75	7	42	18.03.2018	18–24	5	6	60	9
18	22.12.2016	18–21	5	5	70	16	43	24.04.2018	18–21	5	6	100	5
19	31.01.2017	12–15	5	5	15	5	44	07.10.2018	15–21	5	5	40	17
20	01.02.2017	15–18	6	5	60	8	45	28.02.2019	12–15	5	5	60	22
21	02.02.2017	15–18	5	5	55	5	46	01.03.2019	15–18	5	5	30	6
22	01.03.2017	12–18	5	6	50	13	47	11.05.2019	9–12	5	5	45	13
23	02.03.2017	12–15	5	5	50	10	48	14.05.2019	6–9	5	6	70	12
24	06.03.2017	12–15	5	5	105	26	49	08.06.2019	18–21	5	5	60	7
25	27.03.2017	21–24	6	6	45	4	50	09.07.2019	18–21	5	5	45	22

определялись координаты приемника, что позволяло устанавливать его как вертикальные, так и горизонтальные перемещения, а также ошибку определения псевдокоординат¹, которая формировалась по собственным оценкам приемника GPS. При анализе данных использовались временные цифровые ряды с дискретностью 1 мин, сформированные встроенным программным обеспечением прибора.

Вариации магнитного поля регистрировались феррозондовым цифровым магнитометром LEMI-018, обеспечивающим регистрацию в диапазоне ± 68000 нТл с разрешением 10 пТл (частота выборки 1 с^{-1}). Метеорологические параметры атмосферы: атмосферное давление, температура, скорость ветра и влажность воздуха в приземной атмосфере регистрировались с помощью цифровой автоматической метеостанции Davis Vantage Pro2. Результаты регистрации выложены на сайте

¹ Оценка координат по кодовым псевдодальностям без использования фазовых отсчетов.

ИДГ РАН в графическом и цифровом виде (<http://idg-comp.chph.ras.ru/~mikhnevo/>).

Выполнялось сопоставление амплитуды локальных вариаций магнитного поля в период сильных геомагнитных явлений и ошибка определения псевдокоординат. Анализировались временные ряды цифровых данных, полученных при магнитных бурях, характеризующихся индексом геомагнитной активности $K_p = 5$ и 6, за период 2016–2019 гг. Для анализа были выбраны 50 событий (табл. 1), произошедших в периоды, характеризующиеся отсутствием сильных атмосферных явлений в виде мощных атмосферных фронтов, ураганов и шквалов, а также отсутствием возмущений магнитного и электрического поля источниками техногенного происхождения.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что работа такой сложной высокоавтоматизированной информационно-измерительной системы, как GPS, подвержена заметному влиянию магнитных бурь. Особенно ярко это влияние про-

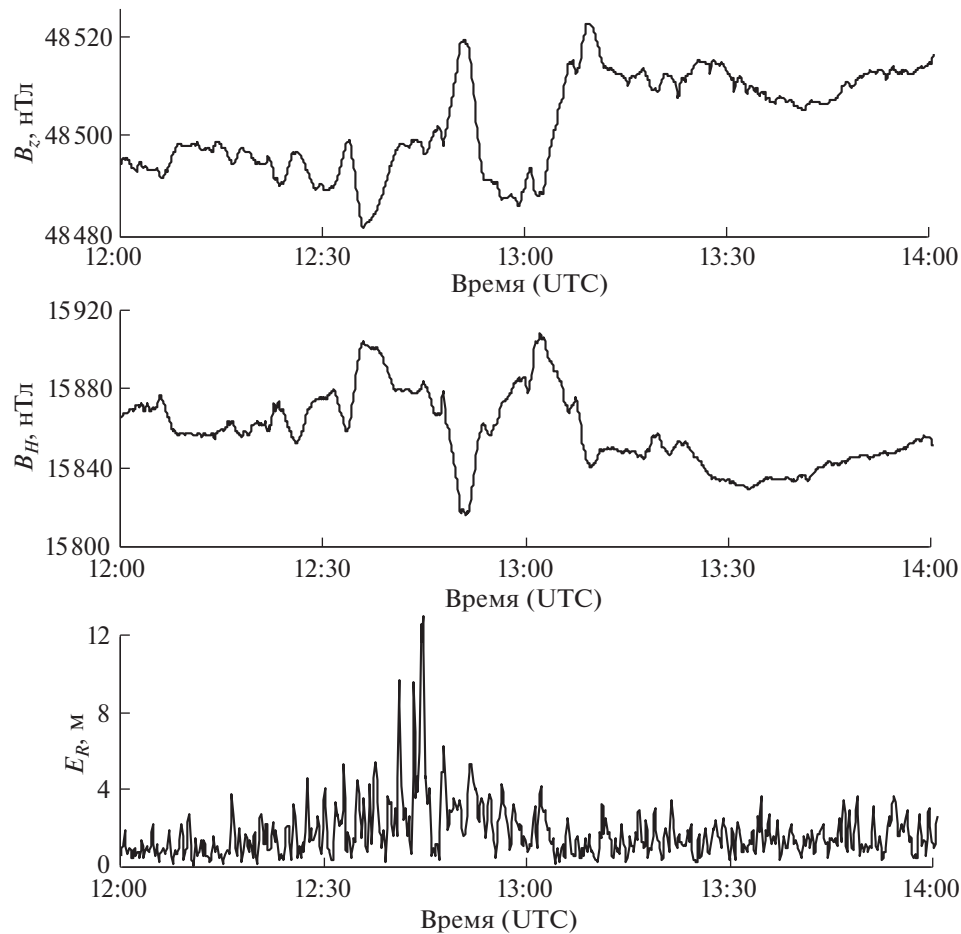


Рис. 1. Вариации горизонтальной B_H и вертикальной B_z компонент индукции магнитного поля и ошибки позиционирования GPS в период магнитной бури 11.03.2016 г. по данным ГФО МНУ.

является при резких изменениях магнитного поля, вызывающих увеличение ошибки позиционирования. В качестве типичного примера рассмотрим магнитную бурю, произошедшую 11.03.2016 г. (индекс магнитной активности $K_p = 5$). Геомагнитное событие по данным ГФО МНУ (станционный индекс магнитной активности $K = 5$) сопровождалось повышенными вариациями горизонтальной B_H и вертикальной B_z компонент индукции магнитного поля (рис. 1). При этом максимальные вариации магнитного поля зарегистрированы в период с ~12:30 до ~14:30 UTC (максимальная амплитуда вариаций B_H и B_z составила соответственно ~40 и ~25 нТл).

На рис. 1 приведена также ошибка определения псевдокоординат GPS-приемника E_R . Из данных рис. 1 следует, что на начальной стадии сильного геомагнитного возмущения наблюдается заметное увеличение ошибки позиционирования, причем ее максимальная величина практически на порядок превышает значение, характерное для периода невозмущенного геомагнитного поля, которое по нашим оценкам составляет величину

порядка 1 м. Следует также отметить, что величина E_R изменяется не монотонно и характеризуется выраженной периодичностью с видимым периодом ~3 мин. Более детальная обработка данных с применением вейвлет-анализа² показывает, что при геомагнитных возмущениях наблюдаются повышенные вариации E_R с периодами в диапазонах примерно 3–8 мин (рис. 2) и 30–60 мин (рис. 3). Такие же периоды вариаций выделяются во время магнитной бури в вариациях магнитного поля (на рис. 2 и 3 приведены для сравнения вейвлет-скалограммы вариаций B_H).

Максимальные значения ошибок позиционирования E^* по данным GPS в периоды рассмотренных сильных геомагнитных возмущений приведены в табл. 1. В целом для всех рассмотренных событий при широком диапазоне изменения B_0 (15–200 нТл) диапазон изменения E^* составляет 4–26 м и при этом одинаков для всего диапазона амплитуд геомагнитных вариаций B_0 .

² В настоящей работе использовался комплексный вейвлет Морле.

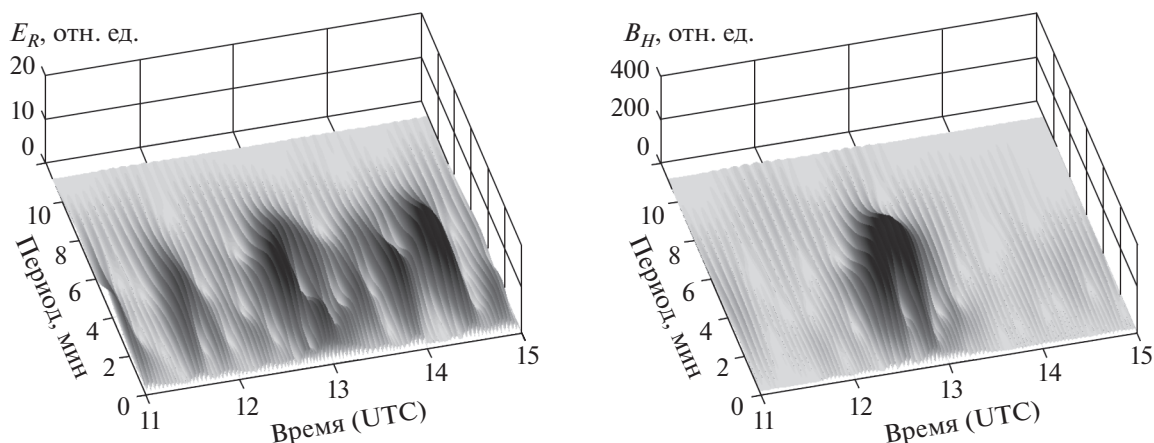


Рис. 2. Вейвлет-скалограммы вариаций ошибки позиционирования E_R и горизонтальной компоненты магнитного поля B_H в минутном диапазоне в период магнитной бури 11.03.2016 г.

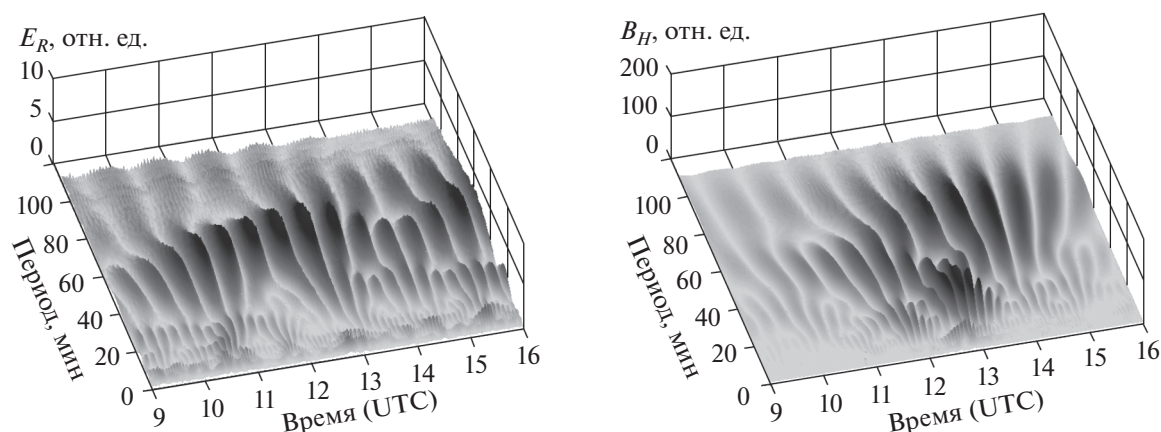


Рис. 3. Вейвлет-скалограммы вариаций ошибки позиционирования E_R и горизонтальной компоненты магнитного поля B_H в часовом диапазоне в период магнитной бури 11.03.2016 г.

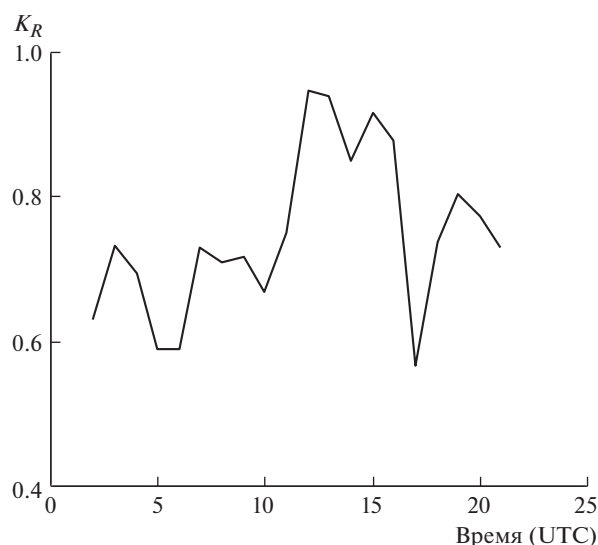


Рис. 4. Коэффициент взаимной корреляции между амплитудами вариаций магнитного поля (горизонтальная составляющая) и ошибкой позиционирования на периоде 5 мин.

Связь между вариацией ошибки позиционирования и вариациями горизонтальной компоненты магнитного поля в период магнитной бури подтверждается высоким значением коэффициента взаимной корреляции K_R между E_R и B_H . Изменение коэффициента взаимной корреляции K_R между указанными величинами в течение суток, вычисленное на часовом интервале для периода 5 мин, приведено на рис. 4.

График на рис. 4 убедительно свидетельствует о том, что в период магнитной бури величина коэффициента взаимной корреляции K_R существенно возрастает и достигает значения 0.95, что свидетельствует о значимой корреляции между E_R и B_H .

Результаты исследований свидетельствуют о том, что наряду с другими возмущающими факторами при интерпретации данных системы GPS необходимо учитывать геомагнитную обстановку, особенно в периоды сильных геомагнитных

возмущений. Это также необходимо при настройке элементов измерительного канала, компенсирующего возмущения, вызванные магнитными бурями. Одновременно с этим полученные в настоящей работе данные позволяют рассматривать вариации ошибки позиционирования в качестве индикатора возмущенного состояния ионосферы и атмосферы при магнитных бурях, а также как параметр, характеризующий степень возмущенности среды и условий распространения в ней высокочастотного электромагнитного сигнала GPS.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены по государственному заданию (тема АААА-А-19-119021890067-0).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. М.: Эко-Трендз, 2003. 299 с.
2. Захаров В.С., Симонов Д.А. Анализ современных дискретных движений блоков земной коры в геодинамически активных областях по данным GPS // Вестник Московского Университета. Сер. 4. Геология. 2010. № 3. С. 25–33.
3. Larson K.M., Boden P., Gombert J. Using 1-Hz GPS Data to Measure Deformations Caused by the Denali Fault Earthquake // Science. 2003. V. 300. P. 1421–1424.
4. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: СО РАН, 2006. 479 с.
5. Афраймович Э.Л., Караченцев В.А., Неудакин А.А. Тестирование трансionoсферного канала распространения радиоволн по данным глобальной сети многоканальных двухчастотных приемников GPS // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 5. С 1–10.
6. Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем // Солнечно-земная физика. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 349 с.
7. Кузьмичева М.Ю., Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Гаврилов Б.Г. Влияние геометрических факторов и алгоритмов обработки данных на ошибки позиционирования ГНСС в ГФО “Михнево” // Динамические процессы в геосферах. Вып. 9. М.: ГЕОС, 2017. С. 136–143.
8. Spivak A.A., Kharlamov V.A. Manifestation of Lunar and Solar Tide in the Spectra of GPS Coordinate Data // Doklady Earth Sciences. 2019. V. 489. Part 1. P. 1330–1332.

GPS POSITIONING ERRORS DURING PERIODS OF MAGNETIC STORMS

A. A. Spivak^{a, #}, S. A. Riabova^a, Yu. S. Rybnov^a, and V. A. Kharlamov^a

^a *Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: aspivak100@gmail.com*

Presented by Academician of the RAS V.V. Adushkin April 15, 2021

The results of the analysis of the data of instrumental observations of variations in the error of determining coordinates by the GPS navigation satellite system during periods of magnetic storms are presented. The initial data are the results of registration performed at the Mikhnevo Geophysical Observatory of IDG RAS. As an example, 50 events that occurred in the period 2016–2019 are considered. It is shown that magnetic storms (the geomagnetic activity index $K_p \geq 5$) cause a noticeable increase in the GPS positioning error. The obtained data can be used when considering the positioning error as an indicator of the disturbed state of the ionosphere and atmosphere during magnetic storms, as well as as a parameter that characterizes the degree of disturbance of the environment and the conditions for the propagation of GPS signals.

Keywords: GPS, magnetic storm, coordinate data, positioning error