Влияние геомагнитной бури 17 марта 2015 г. на точность GPS-позиционирования в одночастотном режиме

Е. И. Данильчук¹, Ю. В. Ясюкевич^{1,2}, А. С. Ясюкевич², Д. А. Затолокин²

¹ *Иркутский государственный университет, Иркутск, 664003, Россия
E-mail: danilchuk.k@mail.ru*

² *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 664033, Россия
E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru*

Проведён анализ влияния геомагнитной бури 17 марта 2015 г. на ошибки позиционирования системы GPS при использовании одночастотного режима. Рассмотрены данные GPS-приёмников, расположенных на разных широтах в американском и азиатском секторах. Анализ проведён для ионосферной коррекции на основе моделей Клобучара (GPS) и GEMTEC (Global empirical model of total electron content), а также глобальных ионосферных карт GIM (Global Ionospheric Maps). Зарегистрировано увеличение ошибок позиционирования до 5–7 раз. Выявлено различие эффектов геомагнитной бури в азиатском и американском секторах. В американском регионе увеличение ошибок возникает во время главной фазы бури и продолжается на ряде станций и во время фазы восстановления. В азиатском регионе эффекты, вызванные геомагнитной бурей, ярко выражены во время фазы восстановления на высоко- и среднеширотных станциях при отсутствии эффектов на приэкваториальных станциях. Указанное различие объясняется, вероятнее всего, разницей локального времени начала геомагнитной бури и соответствующими особенностями ионосферных процессов. Результаты показывают, что коррекция на основе ионосферной модели Клобучара может увеличить общую ошибку позиционирования вследствие значительной переоценки полного электронного содержания во время бури.

Ключевые слова: GPS, геомагнитная буря, ошибки позиционирования, модель Клобучара, модель GEMTEC, глобальные ионосферные карты

Одобрена к печати: 15.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-31-39

Введение

Основная задача любой глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС, *англ.* GNSS — Global navigation satellite system) заключается в определении точных координат приёмника. Существенный недостаток ГНСС состоит в наличии ошибок позиционирования, возникающих при распространении сигнала от спутника до приёмного оборудования. Значимый вклад в величину ошибки вносит состояние среды распространения сигналов ГНСС — ионосферы. Воздействие различных экстремальных факторов космической погоды (геомагнитных бурь, солнечных вспышек и т. п.) оказывает заметное влияние на состояние ионосферы и, как следствие, на точность и стабильность работы ГНСС (Afraimovich et al., 2003; Skone, de Jong, 2000; Stankov et al., 2006; Yasyukevich et al., 2018).

Одним из наиболее значимых факторов космической погоды, способным вызывать сильные возмущения в области ионосферы, является геомагнитная буря. Во время бурь усиление электрических полей и высыпания энергичных частиц (на высоких широтах) приводят к генерации неоднородностей электронной концентрации различного масштаба, в том числе мелкомасштабных интенсивных неоднородностей. В результате сложных процессов взаимодействия в цепочке «атмосфера — ионосфера — магнитосфера» происходит значительное изменение токовой системы и глобальная перестройка ионосферы (Брюнелли, Намгаладзе, 1988).

Мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации (порядка первой зоны Френеля, 100–300 м для ГНСС) приводят к рассеянию сигналов ГНСС и возникновению сильных мерцаний амплитуды и фазы в точке приёма (Yeh, Liu, 1982), что может вызывать срыв сопровождения сигнала от спутника (Ledvina et al., 2002). Генерация интенсивных

мелкомасштабных возмущений, влияющих на работу ГНСС, происходит и на средних широтах вследствие расширения аврорального овала во время геомагнитных возмущений в сторону экватора (Yasyukevich et al., 2020). В результате ухудшается точность позиционирования методами ГНСС (Hernández-Pajares et al., 2006; Jakowski et al., 2005).

Следует также отметить, что в настоящее время большинство пользователей систем спутниковой навигации используют одночастотное оборудование (мобильные устройства, системы транспортного мониторинга и т. п.). В таких приёмниках отсутствуют измерения на второй частоте, поэтому требуется регулярная коррекция данных с целью устранения ошибки, вносимой при распространении сигнала через ионосферу, — так называемой ионосферной ошибки. Основная её составляющая определяется полным электронным содержанием (ПЭС). Для учёта влияния ионосферной погрешности на точность позиционирования ГНСС разработан ряд моделей ионосферной коррекции (Антонович, 2005). При этом вполне ожидаемо, что модели в условиях сильных бурь показывают наихудшую точность.

Цель настоящей работы состоит в исследовании динамики ошибки позиционирования ГНСС в одночастотном режиме с применением различных моделей ионосферной коррекции во время геомагнитной бури 17 марта 2015 г.

Методика обработки данных и ионосферные модели

В работе использовались данные навигационных приёмников сети IGS (International GNSS Service) (Dow et al., 2009), представленные в формате RINEX (Receiver Independent Exchange Format) (Gurtner, Estey, 2007). Были рассмотрены две цепочки приёмников (*рис. 1*), расположенных на разных широтах в американском (~65° з. д.) и азиатском (~120° в. д.) секторах.

Рис. 1. Расположение GPS-приёмников, используемых для анализа. Красным отмечены приёмники, для которых представлена динамика ошибок в данной работе

Решение навигационной задачи осуществлялось по кодовым измерениям (C/A-код на первой частоте) сигналов GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования) в одночастотном режиме с различными типами ионосферной коррекции: без коррекции, по модели Клобучара (Klobuchar, 1987), по модели GEMTEC (Global empirical model of total electron content) (Ivanov et al., 2011) и на основе глобальных ионосферных карт GIM (Global Ionospheric Maps) UQRG (Orus-Perez et al., 2005).

Модель ионосферной коррекции Клобучара разработана в 1970–1980-х гг. (Klobuchar, 1987). Вычислительные ресурсы в микропроцессорных системах навигационных приёмников того времени были весьма ограничены, в результате чего модель Клобучара представляет собой достаточно упрощённую схему. В тёмное время суток эта модель задаёт вертикальное ПЭС как постоянную величину, равную 9,2 TECU. Суточный ход ПЭС в дневное время задаётся отрезком синусоиды. Параметры синусоиды составляют восемь коэффициентов α и β , которые определяются обрабатывающим центром на основе эмпирической модели (Llewellyn, Bent, 1973). Коэффициенты передаются на спутники GPS и далее транслируются потребителям в навигационных сообщениях GPS. Обновление коэффициентов происходит один раз в несколько дней в зависимости от изменчивости ионосферной обстановки. Модель Клобучара компенсирует ~50 % ионосферной ошибки (Klobuchar, 1987).

Модель ионосферной коррекции GEMTEC (Ivanov et al., 2011) является эмпирической моделью ПЭС. Модель основана на данных глобальных ионосферных карт GIM CODE за полный 11-летний цикл солнечной активности. Для получения параметров модели первичные экспериментальные данные разлагались по системе естественных ортогональных функций. Единственный внешний входной параметр модели — индекс солнечной активности F10.7.

Технологии построения глобальных ионосферных карт ПЭС на основе глобальных сетей станций ГНСС появились в конце 1990-х гг. (Roma-Dollase et al., 2018). Расчёт GIM основан на двухчастотных измерениях ГНСС (в основном GPS или GPS/ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система)) с разложением поля ПЭС по базисным функциям (наиболее часто используются сферические гармоники либо томографический подход) и с пространственно-временной интерполяцией. В результате получается эквидистантная сетка с ячейкой 2,5° по широте и 5° по долготе. Временное разрешение GIM — от 2 ч (стандартно) до 15 мин. Для хранения и передачи карт ПЭС в цифровом виде используется формат Ionex (Schaer, Gurtner, 1998). В работе использованы данные GIM UQRG научного центра UPC-IonSAT (IONospheric determination and Navigation based on Satellite and Terrestrial systems) Каталонского политехнического университета (*исп.* Universitat Politècnica de Catalunya), Барселона, Испания.

В качестве инструмента решения навигационной задачи использована программа NAVI (Затолокин, 2020). Применялась маска по углу места спутника 10°. Под величиной ошибки позиционирования в работе понимается полная 3D-ошибка σ :

$$\sigma = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2},$$

где ΔX , ΔY , ΔZ — отклонение измеряемой координаты от истинной (полученной геодезическими методами в постобработке) в трёх направлениях.

Геомагнитная буря 17 марта 2015 г.

Геомагнитная буря 17 марта 2015 г., названная по дню начала бурей Святого Патрика, стала одной из самых мощных геомагнитных бурь 24-го солнечного цикла. Описанию физических процессов и особенностей проявления данной бури посвящено достаточно большое число публикаций (см., например, работы (Полех и др., 2016; Astafyeva et al., 2015)).

На *рис. 2* (см. с. 34) приведена динамика индексов геомагнитной активности SYM-H (см. *рис. 2a*) и AE (см. *рис. 2б*). Внезапное начало магнитной бури зарегистрировано в 04:45 UT. Начальная фаза бури продолжалась ~1,5 ч и характеризовалась значениями SYM-H 45–67 нТл и AE ≤ 100 нТл (за исключением момента внезапного начала бури, когда значение AE-индекса резко изменилось с 52 до 269 нТл). Главная фаза геомагнитной бури, начавшаяся приблизительно в 06:23 UT, продолжалась ~16,5 ч и характеризовалась уменьшением индекса SYM-H до –234 нТл (в 22:47 UT), а также значительной вариабельностью AE-индекса (от ~65 до ~2200 нТл). Фаза восстановления, начавшаяся в 22:47 UT, продолжалась несколько дней (Полех и др., 2016; Astafyeva et al., 2015).

Рис. 2. Индексы SYM-H (а) и AE (б) 17–18 марта 2015 г. Вертикальными штрих-пунктирными линиями на графиках обозначены внезапное начало бури (А), начало главной фазы (В) и фазы восстановления (С)

Экспериментальные результаты

На рис. 3 (см. с. 35) представлена динамика ошибок позиционирования на шести приёмниках (отмечены красным на рис. 1): трёх — в американском секторе и трёх — в азиатском. Влияние бури на точность позиционирования в американском и азиатском регионах проявляется по-разному. В американском регионе оно в основном наблюдается во время главной фазы. Для приёмника BOAV (а также CRO1, UNSA, RGDG, PALM (не показаны)) изменения величины ошибки наблюдались и во время фазы восстановления. В азиатском регионе эффекты бури проявляются в конце главной фазы и во время фазы восстановления.

Принципиальным оказывается и различие в динамике 3D-ошибок на приёмниках, расположенных на разных широтах, но в одном долготном секторе. На высокоширотных приёмниках северного полушария, расположенных в американском секторе, разница между ошибками позиционирования практически незаметна при использовании различных способов коррекции ионосферы. На среднеширотных и приэкваториальных приёмниках наблюдаются скачки ошибок позиционирования в конце главной фазы геомагнитной бури и начале фазы восстановления. Данные скачки характерны для ошибок без применения ионосферной коррекции, а также с использованием моделей Клобучара и GEMTEC. В азиатском секторе наблюдаются скачки ошибок позиционирования в начале главной фазы геомагнитной бури. Практически на всех приёмниках азиатского сектора во время фазы восстановления неэффективно применять модель ионосферной коррекции Клобучара, а на приэкваториальных приёмниках — модель GEMTEC.

Наилучшая точность позиционирования наблюдается при использовании для ионосферной коррекции карт GIM: для ~80–85 % измерений ошибка была наименьшей. Точность определения координат с применением модели GEMTEC для коррекции ионосферной задержки выше, чем при использовании модели Клобучара, за исключением отдельных приёмников (BOAV, TCMS, BNOA).

Чтобы понять, почему возникают те или иные эффекты в динамике ошибок позиционирования при различных способах коррекции ионосферы, необходимо проанализировать ПЭС, получаемое по данным моделям. На рис. 4 (см. с. 36) представлена динамика ПЭС по данным карт GIM UQRG (зелёный цвет), а также по результатам расчётов с использованием моделей Клобучара (красный) и GEMTEC (синий). Постоянное значение для модели Клобучара характерно для ночного периода.

Геомагнитная буря в рассмотренных регионах началась в разное локальное время, поэтому влияние бури на значения ПЭС проявляется по-разному. В американском долготном секторе увеличение ПЭС началось во второй половине главной фазы геомагнитной бури и продолжалось во время ранней фазы восстановления. В азиатском регионе влияние бури на ПЭС наблюдается в течение главной фазы.

Рис. 3. Динамика 3D-ошибки позиционирования в американском (IQAL, BOAV, PALM) и азиатском (YAKT, PIMO, CAS1) секторах 17–18 марта 2015 г. без ионосферной коррекции (чёрные кривые) и с коррекцией с применением моделей Клобучара (красные кривые), GEMTEC (синие) и карт GIM UQRG (зелёные). Жёлтым цветом выделены интервалы, соответствующие дневному локальному времени. Вертикальными штрих-пунктирными линиями обозначены внезапное начало бури (А), начало главной фазы (В) и фазы восстановления (С)

В рассмотренных регионах значения ПЭС, рассчитанные по моделям Клобучара и GEMTEC, отличаются от истинных значений приблизительно в 1,5–5 раз. Во время главной фазы геомагнитной бури значения ПЭС по моделям Клобучара и GEMTEC практически всегда меньше истинных значений ПЭС. В ночное время ПЭС по моделям Клобучара и GEMTEC отличается от истинного значения не более чем на 10 TECU. Таким образом, наиболее сильное отклонение модельных значений ПЭС от данных карт наблюдается в локальное дневное время, когда влияние геомагнитной бури на ионизацию максимально. Этим, скорее всего, объясняется и различие в динамике ошибок позиционирования в американском и азиатском секторах. Из рис. 3 видно, что для большинства станций наибольший рост величины ошибки соответствует времени локального дня.

Стоит отметить, что значения ПЭС, рассчитанные по модели Клобучара, одинаковы в одно и то же локальное время 17–18 марта 2015 г. Данный факт объясняется постоянством коэффициентов α и β , необходимых для расчёта ПЭС (см. выше). Поэтому во время геомагнитной бури применение модели ионосферной коррекции Клобучара может быть неэффективным.

Рис. 4. Динамика вертикального ПЭС в регионе расположения GPS-приёмников в американском (IQAL, BOAV, PALM) и азиатском (YAKT, PIMO, CAS1) секторах 17–18 марта 2015 г. по данным карт GIM UQRG (зелёные кривые) и по моделям Клобучара (красные) и GEMTEC (синие). Интервалы, выделенные жёлтым цветом, обозначают дневное локальное время. Вертикальными штрихпунктирными линиями обозначены внезапное начало бури (А), начало главной фазы (В) и фазы восстановления (С)

Заключение

Анализ данных GPS за 17–18 марта 2015 г. позволил выявить значимое воздействие магнитной бури на точность позиционирования в одночастотном режиме с увеличением полной 3D-ошибки до 5–7 раз, что согласуется с результатами более ранних работ (Демьянов, Ясюкевич, 2014). При этом показано, что влияние геомагнитной бури на точность позиционирования в одночастотном режиме проявляется по-разному в азиатском и американском секторах. Данный результат, вероятнее всего, объясняется различием локального времени начала геомагнитной бури и соответствующими особенностями ионосферных процессов. Принципиальным является также различие динамики 3D-ошибок позиционирования на разных широтах одного долготного сектора. В американском секторе основные эффекты в экваториальном регионе смещены на ночное локальное время, а на средних широтах — на дневное.

При применении ионосферной коррекции наилучшая точность позиционирования наблюдается при использовании карт GIM, далее идёт модель GEMTEC, а затем — модель Клобучара. Результаты показывают, что коррекция на основе ионосферной модели Клобуча-

ра в период геомагнитного возмущения может увеличить общую ошибку позиционирования вследствие значительной переоценки ПЭС в модели.

Значительная переоценка ПЭС в моделях и экспансия аврорального овала в область средних широт маловероятна в условиях умеренных бурь. Также во время умеренных бурь менее вероятно (по сравнению с сильными бурями) развитие крупномасштабных плазменных пузырей и, соответственно, появление интенсивных мерцаний навигационного сигнала в экваториальной области. В этой связи ключевые выводы статьи будут верны именно для сильных бурь. При этом в высокоширотной области схожие эффекты могут развиваться и во время суббурь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской обл. в рамках научного проекта № 20-45-383010, а также при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Литература

1. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография. В 2 т. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. Т. 1. 344 с.
2. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: «Наука», 1988. 526 с.
3. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 349 с.
4. Затолокин Д. А. Программа решения навигационной задачи ГНСС “Navi”. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612010. Рег. 13.02.2020.
5. Полех Н. М., Золотухина Н. А., Романова Е. Б., Пономарчук С. Н., Куркин В. И., Подлесный А. В. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 5. С. 591–605.
6. Afrainovich E. L., Demyanov V. V., Kondakova T. N. Degradation of GPS performance in geomagnetically disturbed conditions // GPS Solutions. 2003. V. 7. P. 109–119. DOI: 10.1007/s10291-003-0053-7.
7. Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick’s Day storm: A global multi-instrumental overview // J. Geophysical Research: Space Physics. 2015. V. 120. No. 10. P. 9023–9037. DOI: 10.1002/2015JA021629.
8. Dow J. M., Neilan R. E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.
9. Gurtner W., Estey L. RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. Astronomical Institute, University of Bern, 2007. URL: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex211.txt>.
10. Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J. Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis // J. Geophysical Research: Space Physics. 2006. V. 111. No. 7. A07S11. DOI: 10.1029/2005JA011474.
11. Ivanov V. B., Gefan G. D., Gorbachev O. A. Global empirical modeling of the total electron content of the ionosphere for satellite radio navigation systems // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011. V. 73. No. 13. P. 1703–1707. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.010.
12. Jakowski N., Wilken V., Schlueter S., Stankov S. M., Heise S. Ionospheric space weather effects monitored by simultaneous ground and space based GNSS signals // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. V. 67. P. 1074–1084. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.02.023.
13. Klobuchar J. A. Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users // IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 1987. V. 3. No. 3. P. 325–331. DOI: 10.1109/TAES.1987.310829.
14. Ledvina B. M., Makela J. J., Kintner P. M. First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. No. 14. Art. No. 1659. 4 p. DOI: 10.1029/2002GL014770.
15. Llewellyn S. K., Bent R. B. Documentation and description of the Bent ionospheric model. Report AFCRL-TR-73-0657. Massachusetts: Hanscom AFB, 1973. 209 p.
16. Orus-Perez R., Hernandez-Pajares M., Juan J., Sanz J. Improvement of global ionospheric VTEC maps by using kriging interpolation technique // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. V. 67. No. 16. P. 1598–1609. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.07.017.
17. Roma-Dollase D., Hernández-Pajares M., Krankowski A., Kotulak K., Ghoddousi-Fard R., Yuan Y., Li Z., Zhang H., Shi Ch., Wang C., Feltens J., Vergados P., Komjathy A., Schaer S., García-Rigo A., Gómez-Cama J. M. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle // J. Geodesy. 2018. V. 92. P. 691–706. DOI: 10.1007/s00190-017-1088-9.

18. Schaer S., Gurtner W. IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1 / Astronomical Institute, University of Berne. 1998. URL: <https://files.igs.org/pub/data/format/ionex1.pdf>.
19. Skone S., de Jong M. The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance // *Earth Planets Space*. 2000. V. 52. P. 1067–1071. DOI: 10.1186/BF03352332.
20. Stankov S. M., Jakowski N., Tsybulya K., Wilken V. Monitoring the generation and propagation of ionospheric disturbances and effects on Global Navigation Satellite System positioning // *Radio Science*. 2006. V. 41. RS6S09. 14 p. DOI: 10.1029/2005RS003327.
21. Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A., Ivanova V., Syrovatskii S., Podlesnyi A. The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS, and HF radio wave propagation // *Space Weather*. 2018. V. 16. P. 1013–1027. DOI: 10.1029/2018SW001932.
22. Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratovsky K., Setov A., Globa M., Syrovatskii S., Yasyukevich A., Kiselev A., Vesnin A. Small-Scale Ionospheric Irregularities of Auroral Origin at Mid-Latitudes during the 22 June 2015 Magnetic Storm and Their Effect on GPS Positioning // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 10. P. 1579. DOI: 10.3390/rs12101579.
23. Yeh K. C., Liu C.-H. Radio wave scintillations in the ionosphere // *Proc. IEEE*. 1982. V. 70. No. 4. P. 324–360. DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.

Effects of the 17 March 2015 geomagnetic storm on GPS single-frequency positioning

E. I. Danilchuk¹, Yu. V. Yasyukevich^{1,2}, A. S. Yasyukevich², D. A. Zatolokin²

¹ *Irkutsk State University, Irkutsk 664003, Russia*
E-mail: danilchuk.k@mail.ru

² *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia*
E-mail: yasyukevich@iszf.irk.ru

We studied the effects of the 17 March 2015 geomagnetic storm on the GPS single-frequency positioning. We used data from GPS receivers located at different latitudes in the American and Asian regions. Analysis involved coordinates estimation based on different ionosphere corrections: Klobuchar model (GPS), GEMTEC (Global empirical model of total electron content), and data from Global Ionospheric Maps. We found 5–7 times increases in positioning errors. Effects of the geomagnetic storm differ in the American and Asian regions. In the American region the effect started during the storm main phase and continued during the storm recovery phase. In the Asian region the effects continued during the storm recovery phase, except equatorial stations. The revealed difference is most likely caused by the difference in the local time of the geomagnetic storm onset and the corresponding features of the ionospheric processes. Due to the total electron content overestimation during the storm, the Klobuchar-based ionospheric correction could increase the 3D positioning error.

Keywords: GPS, geomagnetic storm, positioning errors, Klobuchar model, model GEMTEC, Global Ionospheric Maps

Accepted: 15.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-31-39

References

1. Antonovich K. M., *Ispol'zovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii. V 2 t.* (Satellite radio navigation systems application in geodesy: In 2 vol.), Moscow: FGUP “Kartgeotsentr”, 2005, Vol. 1, 344 p.
2. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A., *Fizika ionosfery* (Ionosphere physics), Moscow: Nauka, 1988, 526 p.
3. Demyanov V. V., Yasyukevich Yu. V., *Mekhanizmy vozdeistviya neregulyarnykh geofizicheskikh faktorov na funktsionirovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem* (Mechanisms of the impact of irregular geophysical factors on the functioning of satellite radio navigation systems: monograph), Irkutsk: Izd. IGU, 2014, 349 p.

4. Zatolokin D. A., *Programma resheniya navigatsionnoi zadachi GNSS "Navi"* (Program for solving the GNSS navigation problem "Navi"), Certificate of state registration of software No. 2020612010 (RU), 13.02.2020.
5. Polekh N. M., Zolotukhina N. A., Romanova E. B., Ponomarchuk S. N., Kurkin V. I., Podlesnyi A. V., Ionospheric effects of magnetospheric and thermospheric disturbances on March 17–19, 2015, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2016, Vol. 56, Issue 5, pp. 557–571, DOI: 10.1134/S0016793216040174.
6. Afraimovich E. L., Demyanov V. V., Kondakova T. N., Degradation of GPS performance in geomagnetically disturbed conditions, *GPS Solutions*, 2003, Vol. 7, pp. 109–119, DOI: 10.1007/s10291-003-0053-7.
7. Astafyeva E., Zakharenkova I., Förster M., Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2015, Vol. 120, No. 10, pp. 9023–9037, DOI: 10.1002/2015JA021629.
8. Dow J. M., Neilan R. E., Rizos C., The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, *J. Geodesy*, 2009, Vol. 83, pp. 191–198, DOI 10.1007/s00190-008-0300-3.
9. Gurtner W., Estey L., *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*, Astronomical Institute, University of Berne, 2007, available at: <https://files.igs.org/pub/data/format/rinex211.txt>.
10. Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2006, Vol. 111, No. 7, A07S11, DOI: 10.1029/2005JA011474.
11. Ivanov V. B., Gefan G. D., Gorbachev O. A., Global empirical modeling of the total electron content of the ionosphere for satellite radio navigation systems, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, Vol. 73, No. 13, pp. 1703–1707, DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.010.
12. Jakowski N., Wilken V., Schlueter S., Stankov S. M., Heise S., Ionospheric space weather effects monitored by simultaneous ground and space based GNSS signals, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, Vol. 67, pp. 1074–1084, DOI: 10.1016/j.jastp.2005.02.023.
13. Klobuchar J. A., Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users, *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 1987, Vol. 3, No. 3, pp. 325–331, DOI: 10.1109/TAES.1987.310829.
14. Ledvina B. M., Makela J. J., Kintner P. M., First observations of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitude, *Geophysical Research Letters*, 2002, Vol. 29, No. 14, Art. No. 1659, 4 p., DOI: 10.1029/2002GL014770.
15. Llewellyn S. K., Bent R. B., *Documentation and description of the Bent ionospheric model*, Report AFCRL-TR-73-0657, Massachusetts: Hanscom AFB, 1973, 209 p.
16. Orus-Perez R., Hernandez-Pajares M., Juan J., Sanz J., Improvement of global ionospheric VTEC maps by using kriging interpolation technique, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2005, Vol. 67, No. 16, pp. 1598–1609, DOI: 10.1016/j.jastp.2005.07.017.
17. Roma-Dollase D., Hernández-Pajares M., Krankowski A., Kotulak K., Ghoddousi-Fard R., Yuan Y., Li Z., Zhang H., Shi Ch., Wang C., Feltenfs J., Vergados P., Komjathy A., Schaer S., García-Rigo A., Gómez-Cama J. M., Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle, *J. Geodesy*, 2018, Vol. 92, pp. 691–706, DOI: 10.1007/s00190-017-1088-9.
18. Schaer S., Gurtner W., *IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1*, Astronomical Institute, University of Berne, 1998, available at: <https://files.igs.org/pub/data/format/ionex1.pdf>.
19. Skone S., de Jong M., The impact of geomagnetic substorms on GPS receiver performance, *Earth Planets Space*, 2000, Vol. 52, pp. 1067–1071, DOI: 10.1186/BF03352332.
20. Stankov S. M., Jakowski N., Tsybulya K., Wilken V., Monitoring the generation and propagation of ionospheric disturbances and effects on Global Navigation Satellite System positioning, *Radio Science*, 2006, Vol. 41, RS6S09, DOI: 10.1029/2005RS003327.
21. Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A., Ivanova V., Syrovatskii S., Podlesnyi A., The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS, and HF radio wave propagation, *Space Weather*, 2018, Vol. 16, pp. 1013–1027, DOI: 10.1029/2018SW001932.
22. Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratovsky K., Setov A., Globa M., Syrovatskii S., Yasyukevich A., Kiselev A., Vesnin A., Small-Scale Ionospheric Irregularities of Auroral Origin at Mid-Latitudes during the 22 June 2015 Magnetic Storm and Their Effect on GPS Positioning, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 10, pp. 1579, DOI: 10.3390/rs12101579.
23. Yeh K. C., Liu C.-H., Radio wave scintillations in the ionosphere, *Proc. IEEE*, 1982, Vol. 70, No. 4, pp. 324–360, DOI: 10.1109/PROC.1982.12313.