

**КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА: ФАКТОРЫ РИСКА ДЛЯ ГЛОБАЛЬНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ****SPACE WEATHER: RISK FACTORS FOR GLOBAL NAVIGATION
SATELLITE SYSTEMS****В.В. Демьянов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vv.emyanov@gmail.com
Иркутский государственный университет путей сообщения,
Иркутск, Россия, vv.emyanov@gmail.com***Ю.В. Ясюкевич***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, yasukevich@iszf.irk.ru***V.V. Demyanov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vv.emyanov@gmail.com
Irkutsk State Transport University,
Irkutsk, Russia, vv.emyanov@gmail.com***Yu.V. Yasyukevich***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, yasukevich@iszf.irk.ru*

Аннотация. Устойчивость и качество работы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) второго поколения (GPS, Galileo, BeiDou/Compass, ГЛОНАСС) и их функциональных дополнений зависят от воздействия экстремальных факторов космической погоды (КП). Представлены сведения о воздействии геомагнитных бурь, ионосферных неоднородностей и мощных всплесков радиоизлучения Солнца на сегмент пользователей ГНСС. Эти сведения подкреплены обзором результатов наблюдений последствий воздействия КП на функционирование ГНСС в 2000–2020 гг. Рассматриваются относительная плотность сбоев измерений радионавигационных параметров и снижение точности позиционирования пользователей ГНСС в режиме двухчастотных измерений и в режиме дифференциальной навигации (Real Time Kinematic, RTK), в том числе при решении задач высокоточного позиционирования (Precise Point Positioning, PPP). Рассмотрена частота появления опасных факторов КП и возможности прогнозирования последствий их воздействия на сегмент пользователей ГНСС. В качестве основных выводов обзора можно выделить следующие: 1) при воздействии экстремальных факторов космической погоды погрешность позиционирования пользователей ГНСС в различных режимах навигационно-временных определений может увеличиваться более чем в 10 раз в сравнении с фоновыми условиями; 2) за последнее десятилетие проведена модернизация космического и наземного сегмента ГНСС, позволившая существенно повысить помехоустойчивость системы в условиях воздействия мощных вспышек радиоизлучения Солнца; 3) существует принципиальная возможность дальнейшего увеличения устойчивости и повышения точности измерения радионавигационных параметров в условиях влияния факторов КП за счет внедрения алгоритмов адаптивной настройки измерителей; 4) в настоящее время остаются нерешенными проблемы контроля целостности системы и доступности требуемых навигационных характеристик с учетом воздействия экстремальных факторов КП.

Ключевые слова: космическая погода, ГНСС, GPS, ГЛОНАСС, солнечные вспышки, магнитные бури, мерцания, PPP, RTK.

Abstract. Extreme space weather events affect the stability and quality of the global navigation satellite systems (GNSS) of the second generation (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou/Compass) and GNSS augmentation. We review the theory about mechanisms behind the impact of geomagnetic storms, ionospheric irregularities, and powerful solar radio bursts on the GNSS user segment. We also summarize experimental observations of the space weather effects on GNSS performance in 2000–2020 to confirm the theory. We analyze the probability of failures in measurements of radio navigation parameters, decrease in positioning accuracy of GNSS users in dual-frequency mode and differential navigation mode (RTK), and in precise point positioning (PPP). Additionally, the review includes data on the occurrence of dangerous and extreme space weather phenomena and the possibility for predicting their impact on the GNSS user segment. The main conclusions of the review are as follows: 1) the positioning error in GNSS users may increase up to 10 times in various modes during extreme space weather events, as compared to the background level; 2) GNSS space and ground segments have been significantly modernized over the past decade, thus allowing a substantial increase in noise resistance of GNSS under powerful solar radio burst impacts; 3) there is a great possibility for increasing the tracking stability and accuracy of radio navigation parameters by introducing algorithms for adaptive lock loop tuning, taking into account the influence of space weather events; 4) at present, the urgent scientific and technical problem of modernizing GNSS by improving the scientific methodology, hardware and software for monitoring the system integrity and monitoring the availability of required navigation parameters, taking into account the impact of extreme space weather events, is still unresolved.

Keywords: space weather, GNSS, GPS, GLONASS, solar flares, magnetic storms, scintillations, PPP, RTK.

СОДЕРЖАНИЕ

Используемая терминология	31
Введение	32
1 Воздействие вспышек солнечного радиоизлучения на функционирование ГНСС	33
1.1 Общие сведения о механизме и характере воздействия радиовспышек	33
1.2 Экспериментальные наблюдения воздействия радиовспышек	35
2 Воздействие геомагнитных возмущений на функционирование ГНСС	38
2.1 Общие сведения о механизме и характере воздействия	38
2.2 Экспериментальные наблюдения воздействия геомагнитных возмущений	40
3 Мерцания амплитуды и фазы сигналов навигационных спутников и их воздействие на функционирование аппаратуры пользователей ГНСС	40
3.1 Физические механизмы воздействия	40
3.2 Экспериментальные наблюдения воздействия мерцаний	42
4 Функционирование ГНСС в дифференциальном режиме в условиях действия факторов космической погоды	43
4.1 Физические механизмы воздействия	43
4.2 Экспериментальные наблюдения	44
5 Интенсивность и частота проявления экстремальных факторов космической погоды, опасных для функционирования ГНСС	44
5.1 Солнечные радиовспышки	44
5.2 Магнитные бури	46
Выводы	47

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

В связи с тем, что статья включает в себя сведения из различных областей знаний, приведем пояснение терминов, необходимых для лучшего понимания текста. Терминология дана не в алфавитном порядке, а собрана смысловыми блоками.

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) — спутниковые радионавигационные системы второго поколения, использующие средние (как основа) и геостационарные орбиты навигационных спутников для решения задачи навигационно-временных определений в глобальной рабочей зоне. В настоящее время развернуто четыре ГНСС: GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), Galileo (Евросоюз), BeiDou/Compass (КНР). Совокупность спутников на орбитах представляет собой *навигационное созвездие*. ГНСС имеют *основную рабочую частоту*, предназначенную для открытого использования в режиме стандартной точности навигационных определений, и *вспомогательные частоты*, используемые для более точных измерений. В частности, навигационные спутники GPS современных модификаций излучают радионавигационные сигналы в трех диапазонах частот (диапазоны L1, L2, L5).

Функциональные дополнения ГНСС (системы локальной и широкозонной дифференциальной навигации/коррекции) — дополнительные средства наземного и космического базирования, которые в пределах своей рабочей зоны формируют корректирующие поправки к погрешностям измерения дальностей или координат объектов, а также предоставляют дополнительную информацию, предназначенную для контроля целостности сегментов ГНСС и доступности требуемых навигационных характеристик.

Пользователь ГНСС — пользователь системы ГНСС и (или) функционального дополнения ГНСС, оснащенный устройством (*навигационным приемником, навигационной аппаратурой пользователя*) для решения задачи навигационно-временных определений на основе обработки сигналов спутников ГНСС и опорных станций дифференциальных систем.

Задача навигационных (навигационно-временных) определений заключается в оценке параметров *вектора состояния объекта*: координат, составляющих вектора скорости и оценки расхождения шкал времени ГНСС и приемника сигналов навигационных спутников. Задача навигационно-временных определений может решаться в двух основных режимах — в режиме автономной навигации и в режиме дифференциальной (или относительной) навигации. Кроме этого, разделяют позиционирование стандартной точности (Standard Point Positioning) и высокой точности (Precise Point Positioning, PPP). В последнем случае решение задачи навигационных определений предполагает использование дополнительных методов и средств постобработки навигационно-временных измерений с их накоплением и коррекцией погрешностей. Режим PPP характеризуется длительным временем сходимости решения (convergence time), что делает его особенно чувствительным к срыву (сбою) сопровождения сигнала на этапе решения задачи навигационных определений.

Режим автономной навигации (Standalone GPS, Standard Point Positioning) — режим использования только сигналов ГНСС для решения задачи навигационно-временных определений, без привлечения дополнительных технических средств, позволяющих уточнить параметры вектора состояния объекта.

Режим дифференциальной навигации (Differential GPS, Real Time Kinematic, RTK) — режим комбинированного использования сигналов ГНСС и дополнительных контрольно-корректирующих сигналов опорной станции или сети станций с известными координатами, которые относятся к функциональным дополнениям ГНСС (дифференциальным системам). Режим дифференциальной навигации позволяет оценить параметры вектора состояния объекта с повышенной точностью за счет коррекции погрешностей измерения дальностей до видимых навигационных спутников (режим коррекции псевдодальностей) или прямой коррекции координат объекта (режим коррекции координат).

Радионавигационный параметр — это параметр сигнала навигационного спутника, который можно непосредственно измерить радиотехническими средствами. ГНСС используют в качестве радионавигационных параметров кодовую псевдозадержку спутник–приемник, псевдофазу несущей и доплеровскую псевдочастоту (приставка «псевдо» обозначает соответствующий параметр, измеренный с погрешностями).

Навигационный параметр — величина, однозначно связанная с радионавигационным параметром и позволяющая вычислить (оценить) параметры вектора состояния объекта. В частности, кодовая псевдодальность равна кодовой псевдозадержке, умноженной на скорость света, фазовая псевдодальность равна псевдофазе, умноженной на длину волны.

Требуемые навигационные характеристики (ТНХ) — директивно заданные предельно допустимые значения абсолютных погрешностей определения параметров вектора состояния объекта и оценок целостности и доступности ГНСС.

Целостность ГНСС — вероятность выдачи пользователю предупреждения о нарушении работоспособности системы или какого-то ее сегмента в течение заданного времени.

Доступность ГНСС — вероятность выдерживания системой требуемых навигационных характеристик в течение заданного времени.

Ошибка позиционирования — отклонение измеренной координаты от ее истинного значения в заданной системе координат. Как правило, разделяют ошибку в плане (в горизонтальной плоскости), ошибку по высоте (в вертикальной плоскости) и полную трехмерную ошибку (3D).

Сбой позиционирования — событие, когда погрешность оценивания одной и более координат объекта превышает предельно допустимые значения или когда информация о текущих координатах объекта отсутствует.

Сбой (срыв) измерения радионавигационного параметра на частоте L1 (L2) — появление аномального значения параметра или отсутствие мгновенного измерения этого параметра. Для фазовых измерений выделяют *cycle slip* — скачок измеряемых значений фазы и *loss-of-lock* — потерю слежения за фазой сигнала.

Космическая погода — совокупность гелиогеофизических факторов, воздействующих на технические системы и средства, в том числе космические аппараты. С точки зрения ГНСС этот термин объединяет экстремальные явления, влияющие на условия распространения радиоволн, такие как мощные магнитные бури, интенсивные ионосферные неоднородности (приводящие к появлению мерцаний трансионосферных сигналов), а также мощные всплески радиоизлучения Солнца в диапазоне рабочих частот ГНСС.

Ионосферные мерцания — случайные быстрые вариации амплитуды и фазы несущей сигнала навигационного спутника вследствие рассеяния сигнала на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации (ЭК) в ионосфере (главным образом в окрестностях максимума ЭК в ионосферном слое F). Для ГНСС часто используются отдельные термины *фазовые мерцания* — случайные короткопериодические резкие колебания фазы и *мерцания амплитуды* — случайные кратковременные провалы мощности принимаемого сигнала.

Магнитная буря — экстремальный процесс в околоземном пространстве, характеризующийся длительной (от нескольких часов до нескольких суток) возмущенностью геомагнитного поля. Основным источником магнитных бурь — корональные выбросы вещества и высокоскоростные потоки частиц от Солнца, которые, достигая окрестностей Земли, ведут к сжатию силовых линий геомагнитного поля. Магнитные бури сопровождаются значительной перестройкой нейтральной атмосферы и ионосферы, а также высыпаниями энергичных частиц в верхней атмосфере, полярными сияниями и генерацией неоднородностей электронной концентрации различных масштабов в ионосфере.

Солнечная радиовспышка — сильное кратковременное увеличение потока солнечного излучения в радиодиапазоне от десятков мегагерц до десятков гигагерц. Для ГНСС наиболее опасным является всплеск радиоизлучения Солнца в рабочем диапазоне частот этих систем 1–2 ГГц.

ВВЕДЕНИЕ

Со времени запуска в эксплуатацию первых глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS (США, 1980 г.) и ГЛОНАСС (СССР, 1990 г.) количество прикладных и научных приложений спутниковой навигации непрерывно растет большими темпами. Сегодня действуют еще две ГНСС — Galileo (Евросоюз) [Galileo-SIS-ICD, 2021] и BeiDou/Compass (Китай) [BDS-SIS-ICD, 2019]. Вводятся в эксплуатацию региональные спутниковые навигационные системы QZSS (Япо-

ния) [<https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-l6-001.pdf>] и GAGAN/NavIC/IRNSS (Индия) [https://www.isro.gov.in/sites/default/files/imss_sps_icd_version1.1-2017.pdf]. Параллельно развивается сегмент широкозонных дифференциальных дополнений ГНСС наземного и космического базирования. Введены в действие широкозонные дифференциальные системы (ШДС) Wide Area Augmentation System (WAAS, США) [GPS-WAAS-PS, 2008], European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS, Евросоюз) [Falcone et al., 2006], BeiDou (Китай) [Shi, Liu, 2006], а также Региональная си-

стема дифференциальной коррекции и мониторинга (РСДКМ, Россия) [ИКД СДКМ, 2012].

Прикладное использование ГНСС привело к появлению и развитию сетей геодинимического и геофизического мониторинга. За последние 20 лет в мире развернуто множество измерительных ГНСС-сетей и центров обработки информации, которые используются для метрологического обеспечения ГНСС, решения научно-исследовательских задач, а также задач прикладной геодезии, например: сеть Международной геофизической службы ГНСС (IGS) [Dow et al., 2009]; UNAVCO [Frey Mueller, 2017]; EUREF [Bruyninx et al., 2012]; CHAIN [Jayachandran et al., 2009], SONEЛ [https://www.sonel.org] и др. Существуют и развиваются непрерывно действующие сети опорных станций (Continuously Operating Reference Stations, CORS) разной ведомственной принадлежности, в том числе и на территории России [Вдовин и др., 2018], например: HIVE [https://hive.geosystems.aero], EFT-CORS [https://eft-cors.ru] и др. Данные ГНСС, как правило, хранятся на сервере данных сети в стандартизованном формате RINEX (Receiver INdependent EXchange) [https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201096516-IGS-Formats] и в большинстве случаев могут свободно использоваться в научно-исследовательских и инженерно-конструкторских целях.

Уже сегодня использование указанных технических средств и систем дает возможность достижения миллиметровой точности позиционирования во многих точках земного шара. В режиме автономной навигации в глобальной рабочей зоне погрешность позиционирования составляет единицы метров при доступности более чем 99 % измерений координат. Очевидно, что в настоящее время осуществляется переход от количества к качеству — формирование интегрированной всемирной глобальной навигационной системы, позволяющей достигать беспрецедентной точности, непрерывности и целостности навигационно-временных определений любых подвижных и стационарных объектов в глобальной рабочей зоне при резком снижении цен на соответствующие сервисы и аппаратуру в сегменте пользователя ГНСС.

В то же время открываются беспрецедентно широкие возможности использования сигналов ГНСС для исследований околоземного космического пространства, атмосферы, океана и земной поверхности из космоса. В частности, важным научным направлением является дистанционное зондирование ионосферы и атмосферы Земли. Цепочка взаимодействий земная кора — атмосфера — ионосфера — магнитосфера — межпланетная среда — Солнце является единой системой, а ионосфера и атмосфера в этих рамках могут рассматриваться как чувствительные индикаторы состояния геосфер и использоваться для построения эффективных систем раннего предупреждения о землетрясениях, цунами и циклонической активности. Построение глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы и его вариаций открывает возможности для климатических исследований ионосферы и ионосферных неоднородностей в глобальном масштабе [Hernandez-Pajares et al., 2009;

Yasyukevich et al., 2020a]. Сегодня активно развиваются такие направления геофизических исследований, как радиозатменные ГНСС-измерения (GNSS-RO), ГНСС-рефлектометрия поверхности Земли и океана (GNSS-R), дистанционное зондирование ионосферы и атмосферы на основе технологий ГНСС [Jin et al., 2014].

На основании сказанного можно констатировать, что ГНСС (и непосредственно связанные с ними функциональные дополнения наземного и космического базирования) переросли первоначальное предназначение — собственно обеспечение навигации — и стали одним из ведущих факторов международного научно-технического прогресса. Такое значение ГНСС имеет обратную сторону — беспрецедентно высокие эксплуатационно-технические требования к ГНСС, включая все сегменты и функциональные дополнения. Одним из важнейших факторов, обуславливающих точность измерений радионавигационных параметров по сигналам ГНСС, является космическая погода.

Возникающая научно-прикладная проблема обеспечения требуемого качества измерений ГНСС для решения прикладных и научно-исследовательских задач в условиях воздействия экстремальных факторов космической погоды ставит фундаментальную научную проблему выявления и количественно-качественной оценки преобладающих радиофизических и радиотехнических механизмов и закономерностей деградации качества характеристик ГНСС.

Цель данной обзорной статьи — анализ современного состояния исследований по указанным выше научной и научно-прикладной проблемам в России и за рубежом. По итогам обзора предлагаются возможные направления совершенствования научно-методических и аппаратно-программных средств ГНСС и их функциональных дополнений с учетом воздействия экстремальных факторов космической погоды.

1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВСПЫШЕК СОЛНЕЧНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГНСС

1.1. Общие сведения о механизме и характере воздействия радиовспышек

Солнце является источником электромагнитного излучения в чрезвычайно широком диапазоне длин волн, включая частотный диапазон сигналов навигационных спутников ГНСС (1–2 ГГц). В последнем случае Солнце может действовать как генератор мощной электромагнитной помехи, подавляющей полезный сигнал навигационных спутников и приводящей к резкому уменьшению отношения сигнал/шум на входе измерителя радионавигационных параметров навигационного приемника. Особенностями всплесков солнечного радиоизлучения в дециметровом диапазоне являются:

1) квазипериодический характер увеличения и уменьшения количества радиовспышек, статисти-

чески слабо связанный с уровнем активности Солнца [Huang et al., 2018];

2) обратная зависимость вероятности возникновения вспышки от ее мощности (чем мощнее вспышка, тем реже она происходит и тем сложнее ее прогнозировать) [Michalek et al., 2009];

3) большой разброс продолжительности и мощности вспышек — от секунд до десятков минут и от 10^2 до 10^6 с.е.п. (солнечная единица потока, 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹) [Dulk, 1985; Michalek et al., 2009];

4) непредсказуемый вид, форма и направление поляризации электромагнитной волны солнечного радиоизлучения [Dulk, 1985];

5) слабая корреляция параметров излучения рентгеновского диапазона и радиоизлучения [Dulk, 1985; Berghmans et al., 2005], что затрудняет прогнозирование опасных радиовспышек.

Вплоть до 2000 г. вспышки солнечного радиоизлучения не рассматривались в качестве серьезной угрозы устойчивому функционированию ГНСС. Так, Klobuchar et al. [1999] оценили потенциально опасный уровень мощности вспышки на уровне 20000 с.е.п. при правосторонней круговой поляризации и 40000 с.е.п. при иной. Такие экстремальные события происходят достаточно редко: за период 1997–2016 гг. произошло всего 21 событие с интенсивностью >10 000 с.е.п. [Huang et al., 2018], при этом два самых мощных из них (>100000 с.е.п.) случились подряд 6 и 13 декабря 2006 г. и привели к серьезным нарушениям в работе ГНСС GPS и ШДС WAAS [Афраймович и др., 2009; Carrano et al., 2007].

Более подробный анализ показал, что солнечные радиовспышки меньшей мощности также способны существенно воздействовать на функционирование ГНСС. Chen et al. [2005] указывают на то, что порог опасного уровня радиовспышки должен быть снижен до 4000–12000 с.е.п. В работе Demyanov et al. [2012a] этот порог понижен еще больше — до 3000 с.е.п. При этом конкретная величина данного порога находится в зависимости от типа алгоритмов первичной обработки сигналов в аппаратуре пользователя ГНСС [Linty, 2010; Demyanov et al., 2012a].

Для выработки мер по повышению помехоустойчивости аппаратуры ГНСС и функциональных дополнений важно знать предельно допустимые значения мощности солнечного радиоизлучения при использовании различных конфигураций радиочастотного тракта и алгоритмов первичной обработки сигналов ГНСС. Известно, что блок слежения за фазой несущей сигнала работает устойчиво при соблюдении условия [Demyanov et al., 2012a]

$$CN_{EQ} \geq CN_{TR} = -10 \lg \left(\Delta T \sqrt{1 + 2A / (\Delta T \Delta F)} - \Delta T \right), \quad (1)$$

$$CN_{EQ} = -10 \lg \left(10^{-0.1 CNR} + 10^{0.1 JS} / (r Q F_{PRN}) \right), \quad (2)$$

где CN_{EQ} — эквивалентное отношение сигнал/шум на входе измерителя фазы несущей с учетом действия радиоизлучения Солнца, дБ Вт; CN_{TR} — пороговое отношение сигнал/шум устойчивости измери-

теля, дБ Вт; ΔT — время интегрирования квадратурных компонент сигнала, мс; ΔF — ширина шумовой полосы сглаживающего фильтра в блоке слежения за фазой, Гц; A — параметр, зависящий от максимальной допустимой погрешности оценки мгновенной фазы с учетом кратковременной нестабильности частоты опорного генератора приемника; CNR — отношение сигнал/шум на входе приемника с учетом потерь мощности в атмосфере, антенне (поляризационные потери) и кабеле, но без учета действия радиошума Солнца, дБ Вт; Q — параметр, зависящий от отношения ширины спектра сигнала к ширине спектра помехи ($Q=1$ для негауссовой узкополосной помехи; $Q=2$ для белого гауссова шума); JS — отношение мощности солнечного радиошума к мощности полезного сигнала, дБ Вт; r — коэффициент, учитывающий потери, обусловленные искажением формы корреляционной функции сигнала дальномерного кода высокой точности P(Y) на частоте L2 ГНСС при использовании полукодовых или бескодовых алгоритмов обработки сигнала; F_{PRN} — эквивалентная частота следования псевдоимпульсов дальномерного кода (например, $F_{PRN}=1.023 \cdot 10^6$ для C/A-кода стандартной точности и $10.23 \cdot 10^6$ для закрытого P(Y)-кода высокой точности GPS).

Выражения (1) и (2) показывают, что помехоустойчивость аппаратуры ГНСС в условиях воздействия солнечных радиовспышек зависит от следующих факторов:

1) характеристик радиотракта навигационного приемника (диаграммы направленности антенны, коэффициента усиления и теплового шума усилителя радиочастоты, потерь мощности в элементах радиотракта, ширины сквозной полосы пропускания высокочастотной части приемника);

2) настройки блока слежения за фазой несущей, порядка астатизма схемы слежения за фазой и кратковременной нестабильности частоты опорного генератора приемника сигналов ГНСС;

3) характеристик дальномерного кода (длительности псевдоимпульса и длины кода);

4) спектральной характеристики помехи в пределах полосы пропускания радиотракта;

5) алгоритма обработки сигналов ограниченного доступа на второй частоте ГНСС, а также алгоритма слежения за фазой несущей в каналах второй рабочей частоты (с привязкой к фазе несущей в канале первой основной частоты ГНСС или без привязки, автономно).

Таким образом, при наблюдении одной и той же вспышки результаты воздействия солнечного радиоизлучения на работу аппаратуры ГНСС могут сильно различаться в зависимости от типа и настроек аппаратуры ГНСС, сигнальной компоненты (по виду дальномерного кода и по несущей частоте) и системы (GPS, ГЛОНАСС и др.).

При сбое в работе следящего измерителя и потере сопровождения части спутников могут происходить резкое ухудшение конфигурации наблюдаемого созвездия навигационных спутников и увеличение ошибки позиционирования. Средняя погрешность определения местоположения точки наблюдения свя-

зана с положением наблюдаемых спутников через геометрический фактор ухудшения точности (Position Dilution of Precision, PDOP) [Kaplan, 1996]:

$$\sigma = \text{DOP} \sigma_{\Delta R} \quad (3)$$

где $\sigma_{\Delta R}$ — средняя погрешность дальномерных измерений видимых спутников; **DOP** — геометрический фактор ухудшения точности позиционирования, который определяется с помощью матрицы направляющих косинусов спутник–приемник для видимых спутников.

При возникновении срывов сопровождения видимых навигационных спутников вследствие солнечных радиовспышек или других гелио-геомагнитных экстремальных событий критическое значение имеет не столько количество «потерянных» спутников, сколько угловое положение «потерянного» спутника. При количестве наблюдаемых спутников ≥ 4 наиболее критичной является потеря спутника с наибольшим углом возвышения [Барабанова, 2010].

1.2. Экспериментальные наблюдения воздействия радиовспышек

С начала эпохи ГНСС одними из первых и, пожалуй, самых ярких примеров ухудшения качества работы ГНСС под воздействием вспышек радиоизлучения Солнца можно считать события, произошедшие 6 и 13 декабря 2006 г. Шестого декабря 2006 г. произошла мощная солнечная рентгеновская вспышка класса X6.5. Эта вспышка не была аномально мощной в рентгеновском (X) и дальнем ультрафиолетовом (EUV) диапазонах, однако за ней последовал мощный всплеск излучения в радиодиапазоне. Согласно данным радиоспектрографа Owens Valley Solar Array (OVSA) [Cerruti et al., 2006, 2008], в интервале времени 19:30–19:40 UT поток радиоизлучения Солнца в диапазоне 1.2–1.6 ГГц превысил 10^5 с.е.п., в отдельные моменты достигая 10^6 с.е.п. (при нормальном фоновом значении ≤ 100 с.е.п.), т. е. по мощности вспышка превзошла все известные с начала эпохи ГНСС радиовспышки как минимум на порядок. Данное экстремальное солнечное событие привело к массовым сбоям в работе многих широкополосных спутниковых радиотехнических систем, в том числе и навигационных систем GPS и ГЛОНАСС [Carrano et al., 2007; Афраймович и др., 2009; Demyanov et al., 2012a].

На рис. 1 приведены данные приемника Ashtech Z-XII (пункт наблюдения Ансон, США), которые показывают резкое ухудшение отношения сигнал/шум на первой и второй рабочих частотах GPS во время максимума радиовспышки 6 декабря 2006 г. [Carrano et al., 2007, 2009]. В период максимальной мощности радиоизлучения (около 19:32–19:38 UT) регистрируются не только резкое ухудшение отношения сигнал/шум, но и срывы сопровождения сигналов всех рассматриваемых спутников на частоте L2 и некоторых спутников на частоте L1 (спутники 02, 04, 27, 28).

В глобальном масштабе по одновременным измерениям радионавигационных параметров на 1500 станциях регистрировалось резкое возрастание относительной плотности сбоев сопровождения фазы несущей сигналов навигационных спутников GPS

$P(t)$ до 18.5 %. Эта статистика наблюдений относится ко всем видимым спутникам с малыми углами возвышения (от 10° до 40°) при всплесках радиоизлучения Солнца мощностью $>100\,000$ с.е.п. При этом на контрольном приемнике сигналов GPS, размещенном в подсолнечной точке, одновременно наблюдался глубокий провал в отношении сигнал/шум с нормального уровня 45 до 10 дБ-Гц (рис. 2) [Афраймович et al., 2008; Афраймович и др., 2009]. Ничего подобного не наблюдается для спутников той же группы в фоновый день (см. отношение сигнал/шум, показанное черной линией на рис. 2, б).

Всплески радиоизлучения Солнца (рис. 2, д) хорошо коррелируют и с провалами в отношении сигнал/шум (рис. 2, б), и с возрастанием относительной плотности пропусков измерений $W(t)$ всех радионавигационных параметров за эпоху измерений (рис. 2, в, з) для спутников, которые наблюдались под примерно одинаковыми углами возвышения. В частности, плотность пропусков измерений $W(t)$ для спутника GPS PRN 12 достигала 82 % (рис. 2, в). Максимумы пропусков измерений $W(t)$ совпадают по времени с максимумами потока солнечного излучения (отметки времени T1, T2 и T3 на рис. 2, д). Пропуски измерений — более негативное явление, чем усиление шумов, с точки зрения точности позиционирования: отсутствие измерений всех радионавигационных параметров в текущую эпоху измерений влечет за собой сбой позиционирования. Существенно слабее воздействие радиовспышки было выражено для спутников с углами возвышения $>40^\circ$ (рис. 2, а, штриховая линия). Это можно объяснить более высоким отношением сигнал/шум в случае приема сигналов от спутников с большими углами возвышения.

Пространственное распределение интенсивности сбоев измерений фазы несущей на частоте L2 GPS продемонстрировано на рис. 3. Видно, что во время максимума радиоизлучения двухчастотный режим измерений в приемниках GPS был недоступен фактически на всей освещенной стороне Земли (рис. 3, верхняя панель; момент 19:34 UT, которому соответствует снимок на верхней панели, отмечен на нижней панели красной точкой).

Рентгеновская вспышка более высокого класса не обязательно сопровождается столь же мощным всплеском радиоизлучения в диапазоне 1–2 ГГц. Например, рентгеновская вспышка 28 октября 2003 г. класса X17.2 сопровождалась потоком радиоизлучения, не превышавшим 6500 с.е.п. (рис. 4, б). Относительная плотность пропусков отсчетов $W(t)$ оказалась гораздо меньше, чем 6 декабря 2006 г., и здесь не приводится. Несмотря на то, что уровень радиоизлучения вспышки 28 октября 2003 г. был на два порядка ниже, чем экстремальной вспышки 6 декабря 2006 г., относительная плотность сбоев измерений фазы на частоте L2 в три раза превысила фоновое значение и достигла $P_{\max} = 1.66$ % при обработке измерений всех видимых спутников. Форма кривой интенсивности сбоев измерений фазы на дневной стороне хорошо коррелирует с формой огибающей потока радиоизлучения, зарегистрированного на радиоспектрографе TRST в Триесте сети RSTN [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-1-second/>]. Относи-

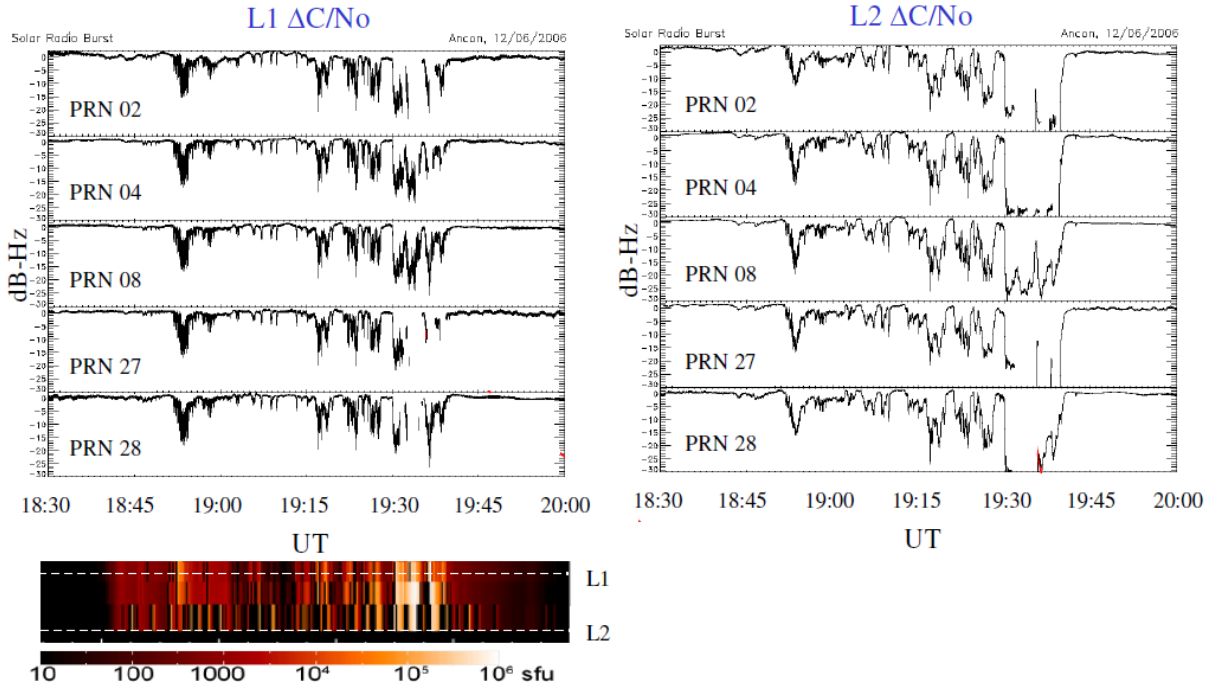


Рис. 1. Динамика отношения сигнал/шум для отдельных спутников GPS на рабочих частотах L1 (левая панель) и L2 (правая панель) в условиях экстремальной солнечной вспышки 6 декабря 2006 г. Цветовая шкала внизу показывает распределение мощности потока радиоизлучения с 18:30 до 20:00 UT. Рисунок заимствован из работы [Carrano et al., 2009]

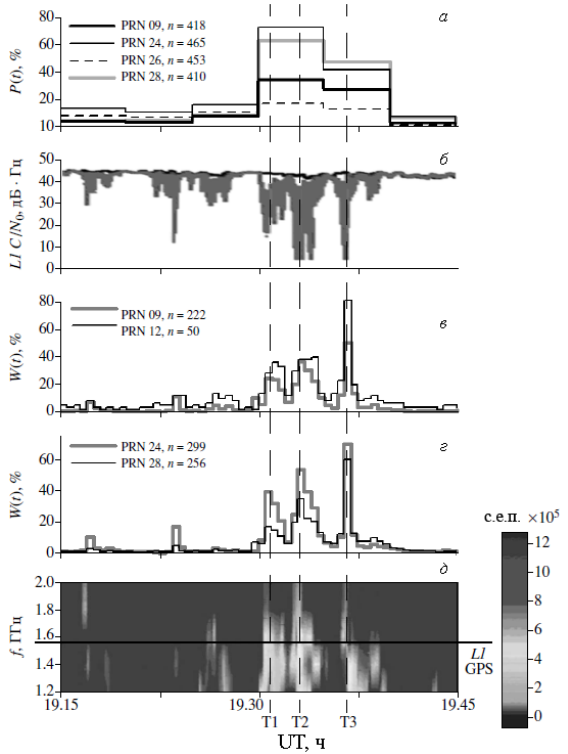


Рис. 2. Сбои измерения радионавигационных параметров 6 декабря 2006 г.: *a*, *в*, *г* — сбои измерений фазы $P(t)$ и пропуски отсчетов $W(t)$ для различных спутников GPS; *б* — отношение сигнал/шум на первой частоте GPS, записанное на специализированном GPS-приемнике; *д* — спектр радиоизлучения Солнца в диапазоне 1.2–2.0 ГГц по данным радиоспектрографа OVSA. Рисунок взят из статьи [Афраймович и др., 2009]

тельная плотность сбоев на ночной стороне Земли (тонкая линия) не превышала фонового значения.

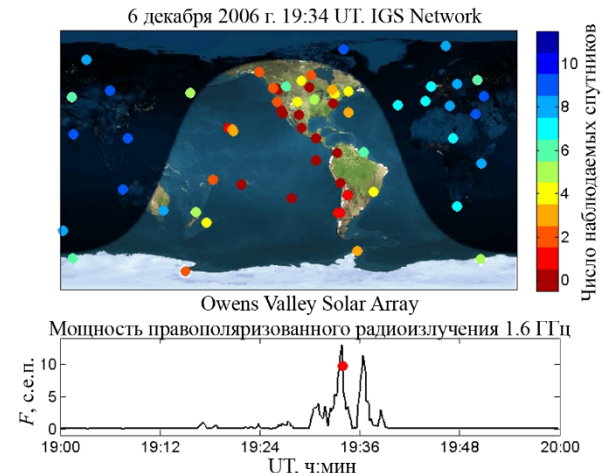


Рис. 3. Число наблюдаемых спутников с доступными двухчастотными измерениями псевдодальности по данным сети IGS (вверху) и профиль радиоизлучения (внизу) во время радиовспышки 6 декабря 2006 г. Рисунок взят с сайта [http://gps.ece.cornell.edu/briefs.php]

Поскольку главная причина ухудшения качества работы ГНСС и ШДС при воздействии солнечных радиовспышек состоит в резком уменьшении эквивалентного отношения сигнал/шум на входе следящего измерителя, то увеличение мощности сигнала спутников должно снизить ущерб от таких явлений. Согласно интерфейсному контрольному документу GPS [https://gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf], на новых спутниках, начиная с блока III-R-M, мощность излучаемого сигнала была увеличена. Радиовспышки 24 сентября 2011 г. [Sreeja et al., 2013] и 6 сентября 2017 г. [Berdermann et al., 2018; Yasyukevich et al., 2018], относящиеся по классификации [Huang et al., 2018] к экстремальным и опасным соответственно,

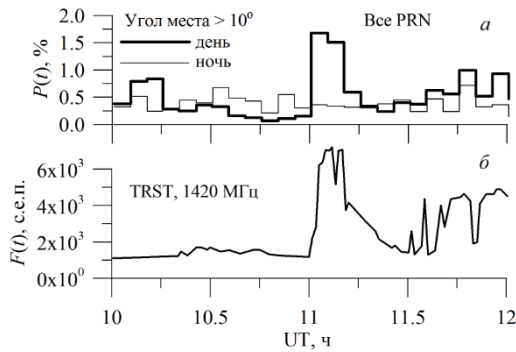


Рис. 4. Относительная плотность сбоя измерений фазы несущей $P(t)$ (а) под воздействием солнечной радиовспышки 28 октября 2003 г. для всех спутников GPS на освещенной стороне Земли и поток радиоизлучения Солнца (б) по данным радиоспектрографа TRST в Триесте на частоте 1420 МГц. На верхней панели: утолщенная линия — зависимость интенсивности сбоя измерений фазы $P(t)$ для дневной стороны Земли, полученная для $n=2452$ лучей спутник–приемник при углах возвышения $\theta > 10^\circ$; тонкая линия — те же данные для ночной стороны. Рисунок взят из статьи [Афраймович и др., 2009]

дают возможность сравнить воздействие вспышек на спутники нового и старого поколения.

Рисунок 5 показывает динамику принимаемой мощности сигналов спутников для разных сигнальных компонент (серые, синие и черные кривые) и динамику мощности радиоизлучения Солнца во время упомянутых радиовспышек (красная кривая). Измерения мощности сигнальных компонент $S1C$ (открытый сигнальный компонент, частота L1) и $S2W$ (закрытый сигнальный компонент, частота L2) были получены как для старых (IA/IIR-A), так и для новых (IIR-M/IF) орбитальных блоков GPS. Приведенные измерения мощности компоненты $S2X$ (открытый сигнальный компонент, частота L2) позволяют оценить преимущества использования новых открытых кодов (L2C). В качестве порога мощности сигнала, который определяет потенциальную помехоустойчивость приемника ГНСС, принято значение 20 дБ-Гц [Psiaki, 2001]. На рисунке этот пороговый уровень отмечен оранжевыми штрихами.

Видно (рис. 5), что солнечные радиовспышки сопровождаются понижением мощности принимаемого сигнала — в меньшей степени на частоте L1 и в значительно большей степени на частоте L2. В максимуме экстремальной вспышки 24 сентября 2011 г. мощность принимаемого сигнала L2 блока IA падает ниже 20 дБ-Гц, в то время как для блока IIR-M минимальные значения на ~ 5 дБ-Гц выше (рис. 5, б). При использовании сигнала открытого кода ($S2X$) снижение мощности сигнала на частоте L2 намного меньше (выигрыш ~ 15 –20 дБ-Гц) и сопоставимо с аналогичным провалом в мощности сигнала открытого доступа на частоте L1 GPS (рис. 5, а). Для новых орбитальных блоков IF с повышенной мощностью сигналов полностью отсутствует эффект от радиовспышки 2017 г. на частоте L1 GPS (рис. 5, в) при достаточно слабом воздействии на сигнал на частоте L2 (рис. 5, г). В последнем случае использование на частоте L2 кода открытого доступа еще в большей степени сокращает по времени и уменьшает

провал в мощности сигнала во время максимума радиовспышки.

С практической точки зрения важна финальная точность позиционирования пользователей ГНСС при воздействии опасных радиовспышек. На рис. 6 приведены данные о точности позиционирования при воздействии трех радиовспышек, произошедших в 2002–2011 гг. Решение навигационной задачи выполнялось нами в двухчастотном режиме стандартной точности [Hofmann-Wellenhof et al., 2001] (а, в, д) и высокой точности (PPP, б, г, е) [Zumberge et al., 1997]. Расчеты погрешностей позиционирования в двухчастотном режиме стандартной точности выполнены с использованием программно-алгоритмического обеспечения Navi [Затолокин, 2020]. Расчеты в режиме PPP осуществлялись с использованием программного обеспечения GAMP [Zhou et al., 2018].

Рисунок 6 дает также представление о результатах модернизации системы путем совершенствования аппаратуры спутников. Наблюдения 2002 г. показывают достаточно высокий фоновый уровень погрешности дальномерных измерений — до 10–15 м. Однако даже при таких больших фоновых погрешностях можно отметить ухудшение точности позиционирования в 4–5 раз вследствие воздействия солнечной радиовспышки. Более поздние наблюдения 2006 г. демонстрируют существенно более низкий фоновый уровень погрешности дальномерных измерений (2–8 м). При этом солнечная радиовспышка привела к ухудшению точности позиционирования в 2–3 раза по сравнению с наблюдениями в фоновый день. Наблюдения 2011 г. также показывают достаточно низкий фоновый уровень дальномерной погрешности (не более 6.5 м). Во время радиовспышки наблюдается ухудшение точности позиционирования в 8–10 раз относительно фонового дня, причем эффект очень отчетливый и хорошо коррелирует с ходом кривой плотности потока мощности солнечного радиоизлучения. Таким образом, несмотря на усовершенствование систем ГНСС, проблема воздействия всплесков радиоизлучения Солнца на финальную точность определения местоположения сохраняется.

Точность навигации в кинематическом режиме PPP составляет в обычных условиях десятки сантиметров (рис. 6, б, г, е). Увеличение погрешности позиционирования хорошо коррелирует с интенсивностью радиовспышки. Во время максимумов радиовспышек точность позиционирования в режиме PPP ухудшалась до единиц метров. В 2011 г. в представленных данных вообще наблюдается сбой функционирования режима PPP, в то время как стандартный двухчастотный режим сохранил работоспособность, хоть и с пониженной точностью. Во время солнечной вспышки 6 сентября 2017 г. (максимум мощности 19604 с.е.п.) средняя погрешность позиционирования в двухчастотном режиме PPP увеличилась с 0.2 м для GPS и с 0.5 м для ГЛОНАСС до ~ 0.6 м [Yasyukevich et al., 2018].

Наряду с воздействием солнечного радиоизлучения могут оказаться значимыми эффект резкого изменения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы

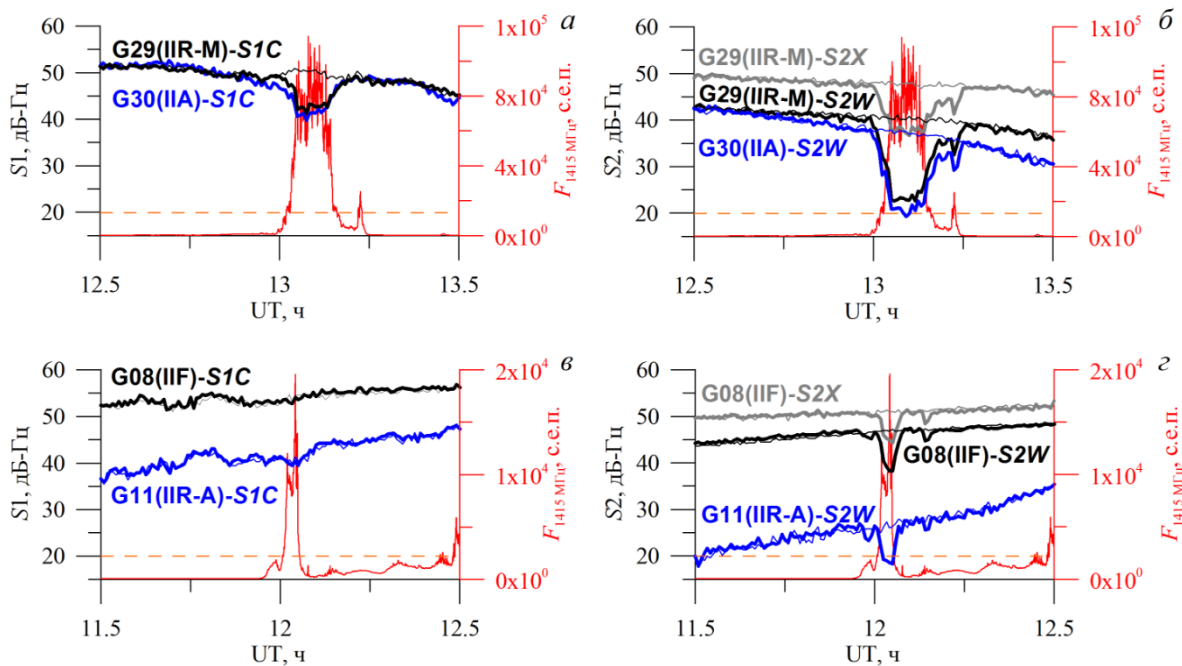


Рис. 5. Динамика солнечного радиоизлучения на частоте 1415 МГц (красные кривые, шкала справа) и мощности принимаемого сигнала GPS (черные, синие и серые кривые, шкала слева) на частотах L1 (левые панели) и L2 (правые панели) во время солнечных радиовспышек 24 сентября 2011 г. (а, б) и 6 сентября 2017 г. (в, з): синие утолщенные кривые — мощности сигналов *S1C* и *S2W* для спутников IIA/IIR-A; черные утолщенные кривые — мощности сигналов *S1C* и *S2W* для спутников IIR-M/IIF; утолщенная серая кривая — мощность сигнала *S2X* для спутников IIR-M/IIF; тонкие линии — мощности соответствующих сигналов в предшествующие вспышкам дни 23 сентября 2011 г. и 5 сентября 2017 г. Данные получены на контрольном приемнике в пункте измерений ZIM2 (США). Поток радиоизлучения приводится по данным спектрографа Sagamore Hill сети RSTN. Рисунки заимствованы из статьи [Yasyukevich et al., 2021]

[Rodríguez-Bilbao et al., 2015] вследствие образования мелкомасштабных неоднородностей и сопутствующее рассеяние навигационного сигнала. Следует отметить, что одночастотный режим PPP является более устойчивым к негативным факторам повышенного радиоизлучения, чем двухчастотный режим PPP [Berdermann et al., 2018]. В экстремальных условиях, при более высокой вероятности срыва сигналов на частоте L2, одночастотный режим PPP может обеспечить более высокие надежность и точность позиционирования. При этом основное время двухчастотный режим PPP является более точным по сравнению с одночастотным.

2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГНСС

2.1. Общие сведения о механизме и характере воздействия

Главную роль в формировании геомагнитных возмущений играют корональные выбросы массы (КВМ) и высокоскоростные потоки частиц, связанные с коротящими областями взаимодействия (CIR) на Солнце. Наиболее вероятными драйверами геомагнитной бури являются магнитные облака, ассоциированные с КВМ [Yermolaev et al., 2013]. Корональные выбросы массы сопровождаются испусканием потоков ускоренных заряженных частиц (электронов и протонов). Если ось распространения потока частиц совпадает с направлением на Землю,

то самые энергичные частицы (с энергией 10^8 – 10^9 эВ) приходят к Земле спустя ~ 10 мин после максимума КВМ. Этот поток частиц, иногда наблюдающийся в течение нескольких десятков часов [Бруцек, Дюран, 1980], вызывает усиление электрических токов в околоземном космическом пространстве (электроструи), авроральные эмиссии заряженных частиц и, как вторичный эффект, генерацию мелкомасштабных ионосферных неоднородностей электронной концентрации в авроральной области.

Другим последствием КВМ и CIR является генерация мощной ударной волны, распространяющейся в межпланетном пространстве. При типичной скорости ~ 500 км/с эта ударная волна за 3–4 сут [Gulyaeva, Gulyaev, 2020] (при сверхбыстрых КВМ со скоростями 2500 км/с — за ~ 12 ч) достигает Земли и приводит к сжатию магнитосферы. При южном направлении межпланетного магнитного поля (ММП) происходит пересоединение магнитных силовых линий ММП и геомагнитного поля и захват солнечных энергичных частиц магнитосферой Земли. Результатом является усиление электроструи, встречное магнитное поле которой вызывает резкое уменьшение *H*-компоненты геомагнитного поля продолжительностью от нескольких часов до суток (главная фаза геомагнитной бури) [Акасофу, Чепмен, 1975].

Большинство магнитосферных процессов проявляется в значительных вариациях параметров ионосферы и плазмосферы Земли [Базаржапов и др., 1979], особенно во время главных фаз глобальных геомагнитных бурь. Обусловленные теми же причинами

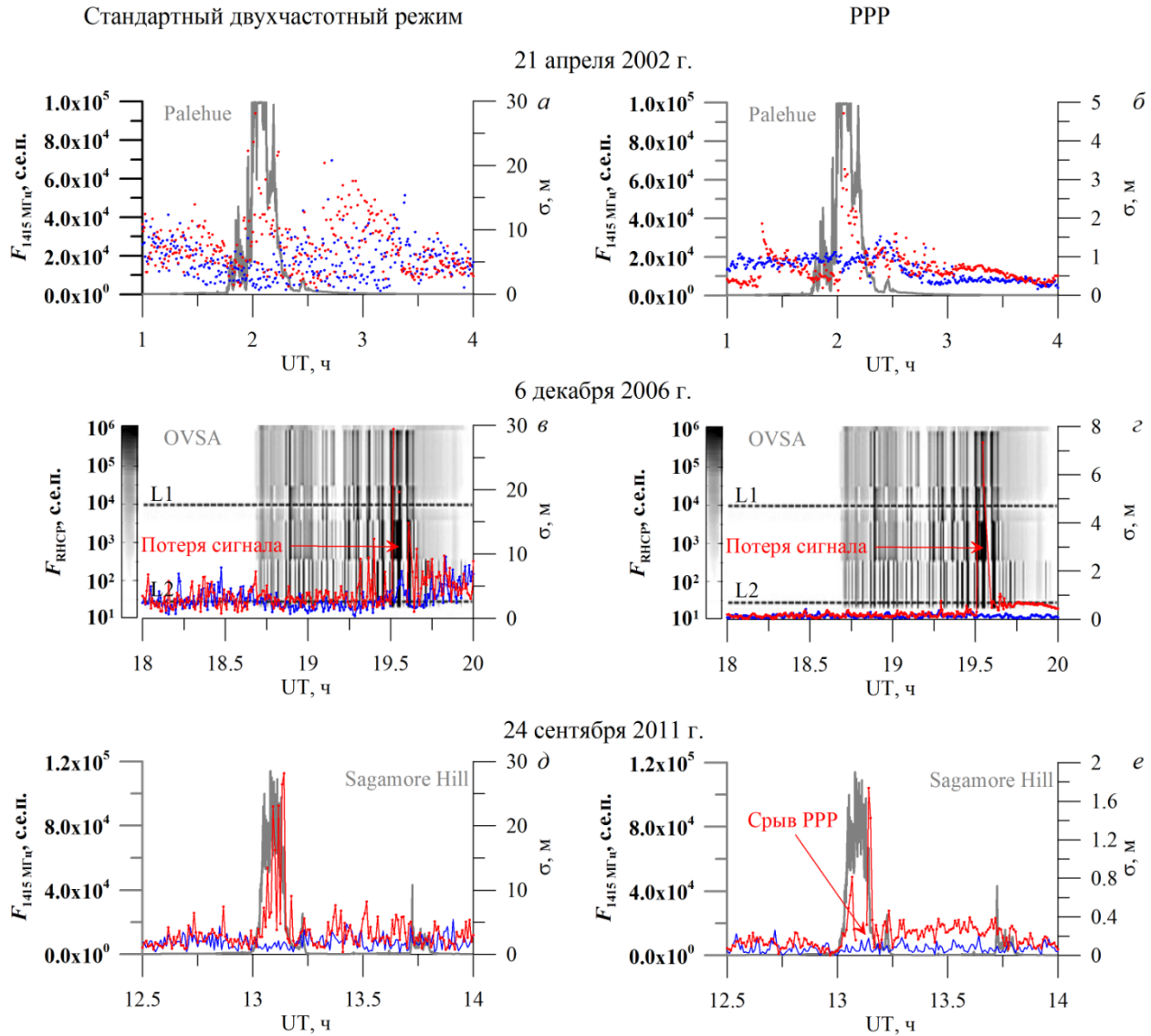


Рис. 6. Ухудшение точности позиционирования по сигналам ГНСС в двухчастотных режимах стандартной (а, в, д) и высокой (PPP, б, з, е) точности в условиях воздействия солнечных радиовспышек 21 апреля 2002 г. (а, б), 6 декабря 2006 г. (в, з) и 24 сентября 2011 г. (д, е): красная кривая — данные в день регистрации вспышки, синяя кривая — в фоновый день. Серым цветом показан поток излучения на частоте 1415 МГц (шкала слева) и приведены названия радиоспектрографов; шкала справа — погрешность позиционирования. Станции ГНСС, расположенные в подсолнечной точке с максимальным зенитным углом Солнца: MAUI (2002 г.), BUEN (2006 г.) и VJCO (2011 г.)

более слабые и частые возмущения — суббури — развиваются в магнитосфере полярных областей [Базаржапов и др., 1979]. Вызванные бурями и суббурями нерегулярные вариации электронной концентрации и ПЭС в ионосфере и плазмосфере с локальным и глобальным распределениями имеют продолжительность от нескольких минут до нескольких суток [Афраймович, Первалова, 2006].

В основном эффекты геомагнитных бурь проявляются на высоких и низких широтах. На высоких широтах эффекты геомагнитных бурь связаны с высыпаниями энергичных частиц, дополнительной ионизацией и формированием мелкомасштабных неоднородностей, приводящих к рассеянию сигнала, а на низких широтах — с усилением кольцевого тока и развитием плазменных неустойчивостей в ионосфере. Расширение аврорального овала на средние широты приводит к появлению значимых эффектов

бурь и в этих областях [Афраймович, Первалова, 2006].

Эффекты распространения радиоволны через неоднородную и нестационарную ионосферу и плазмосферу, за исключением интерференционных замираний и мерцаний амплитуды и фазы сигнала (которые зависят от характеристик и характера распределения локальной электронной концентрации), непосредственно связаны с величиной ПЭС вдоль траектории распространения и скоростью его изменения [Яковлев, 1998]. К этим эффектам относятся фазовое и групповое запаздывание, включая его рефракционные флуктуации, а также регулярные и нерегулярные изменения уровня сигнала ГНСС при его прохождении через ионосферу (рефракционное ослабление и поляризационный фединг вследствие эффекта Фарадея) [Харгривс, 1982].

Рефракционное приращение группового (фазового) пути в ионосфере зависит от распределения коэффициента преломления вдоль пути сигнала:

$$dR = \pm \frac{40.4}{f^2} \int_s N(s) ds = \pm \frac{40.4}{f^2} I, \quad (2.1)$$

где $N(s)$ — функция распределения электронной концентрации вдоль траектории сигнала; f — несущая частота сигнала, Гц; $I = I_0 + dI$ — ПЭС вдоль траектории спутник–приемник; I_0 — регулярная часть ПЭС вдоль траектории спутник–приемник; dI — флуктуационная составляющая ПЭС, обусловленная вариациями величины $N(s)$ вдоль траектории спутник–приемник.

Кроме того, мощность сигнала на входе следящего измерителя радионавигационных параметров через отношение сигнал/шум связана с величинами среднеквадратичных отклонений погрешностей оценивания фазы и кодовой псевдозадержки. Вариации мощности сигналов навигационных спутников на выходе из неоднородного и нестационарного ионосферного слоя (вследствие поляризационного фединга и рефракционного затухания) приведут к увеличению погрешности измерений радионавигационных параметров по сигналам ГНСС в условиях геомагнитных возмущений.

Указанные рефракционные эффекты являются значимыми для случаев позиционирования по сигналам ГНСС в одночастотном режиме измерений, а также при использовании дифференциальной навигации, эффективность которой ограничена пространственно-временными градиентами ПЭС в пределах рабочей зоны системы [Warnant et al., 2007]. Однако наиболее существенным негативным проявлением геомагнитных вариаций и бурь являются ионосферные мерцания. В разделе 3 будет отдельно проанализирован механизм воздействия ионосферных мерцаний на качество работы ГНСС при использовании стандартного двухчастотного режима измерений и при решении задач высокоточного позиционирования (режимы PPP, RTK).

2.2. Экспериментальные наблюдения воздействия геомагнитных возмущений

Первые экспериментальные работы показали, что качество работы GPS в условиях магнитных бурь снижается [Coster et al., 2001; Афраимович и др., 2002]. Учащение сбоев сопровождения навигационного сигнала наблюдалось, как правило, на главной фазе магнитной бури при максимальной возмущенности геомагнитного поля (рис. 7). При этом число сбоев измерений радионавигационных параметров по сигналам отдельных спутников коррелирует с интенсивностью геомагнитной бури [Astafyeva et al., 2014]. Потеря сигналов даже одного навигационного спутника может привести резкому увеличению геометрического фактора и, соответственно, к росту ошибки позиционирования [Демьянов, Ясюкевич, 2014].

Наиболее сильные эффекты воздействия магнитных бурь, в том числе максимальное количество срывов измерений фазы, наблюдаются в области аврораль-

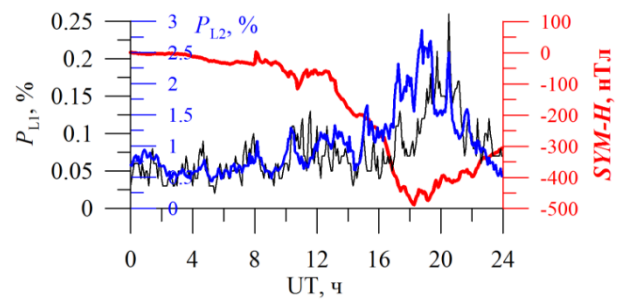


Рис. 7. Динамика срывов сопровождения фазы сигналов GPS на главной фазе магнитной бури 20 ноября 2003 г. по данным мировой сети приемников: красная линия — индекс геомагнитной активности SYM-H (шкала справа); черная и синяя кривые — относительное число срывов измерения фазы на частотах L1 и L2 соответственно (шкала слева). Данные приводятся на основе рис. 3 из [Astafyeva et al., 2014]

ного овала [Astafyeva et al., 2014]. Именно в этой области регистрируются наиболее сильные вариации геомагнитного поля и ПЭС [Kozyreva et al., 2017]. На рис. 8 можно видеть, что на высоких широтах регистрируются и максимальные ошибки позиционирования в режиме PPP.

Оптические данные подтверждают, что сбои сопровождения навигационных сигналов ГНСС связаны с высыпанием авроральных частиц в высокоширотной ионосфере [Захаров и др., 2020]. Установлено также, что при расширении аврорального овала на средние широты туда же смещается область повышенных погрешностей позиционирования в различных режимах определения координат [Демьянов, Ясюкевич, 2014; Afraimovich et al., 2009; Yasyukevich et al., 2020b].

3. МЕРЦАНИЯ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ГНСС

3.1. Физические механизмы воздействия

Основной причиной возникновения сильных мерцаний амплитуды и фазы сигнала служит его рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации с размерами порядка радиуса первой зоны Френеля: $r = \sqrt{\lambda z}$ (z — эффективное расстояние до слоя, содержащего неоднородности; λ — длина волны) [Кравцов, 1983]. Для ГНСС величина первой зоны Френеля составляет 100–300 м. Рассеяние на неоднородностях больших масштабов (единицы и десятки километров) преимущественно проявляется в виде мерцаний (короткопериодических вариаций) фазы [Bhattacharyya et al., 1992].

Количественной мерой для оценки интенсивности мерцания амплитуды и фазы обычно служат индексы мерцаний S_4 и σ_f соответственно. В режиме слабых мерцаний ($S_4 \leq 0.3$ – 0.4 и $\sigma_f \leq 0.1$ – 0.2) существует линейная зависимость между индексами S_4 , σ_f и интен-

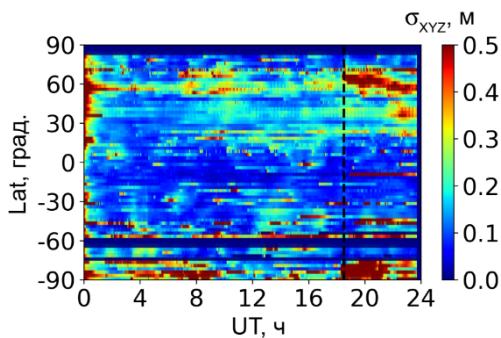


Рис. 8. Широтная-временная зависимость ошибок PRR 22 июня 2015 г. в американском секторе (рис. 5b из [Yasyukevich et al., 2020b])

сивностью неоднородностей электронной концентрации [Rino, 2011]. Поскольку интенсивность неоднородностей влияет на параметры радиосигнала, на основе индексов мерцаний возможно построение прогноза устойчивости работы радиотехнических систем, использующих трансионосферный канал распространения радиоволн [Пашинцев, Ахмадеев, 2015].

При распространении сигнала в толстом слое рассеивающих неоднородностей сильные амплитудные мерцания формируются за счет дифракционного эффекта (рассеивание и многократная интерференция дифрагированных волн). Сильные фазовые мерцания в этом же случае формируются в основном как результат рефракционного дрожания луча при прохождении через слой с неоднородностями электронной концентрации [Kolesnik et al., 2002]. Таким образом, в случае многократного рассеяния сильные ионосферные мерцания амплитуды и фазы имеют различную природу возникновения и, следовательно, различный характер спектров мерцаний амплитуды и фазы [McCaffrey, Jayachandran, 2017] и характеризуются различной реакцией индексов мерцаний S_4 и σ_f .

Мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации практически всегда наблюдаются в высокоширотной и экваториальной (вечерне-ночной) ионосфере [Aarons, 1982]. Это объясняется тем, что в авроральных областях и на экваториальных широтах в ионосфере устойчиво действуют механизмы генерации неоднородностей рассматриваемых масштабов — двухпотоковая и градиентно-дрейфовая неустойчивости [Акасофу, Чепмен, 1975]. При этом поддерживается условие возникновения мелкомасштабных неоднородностей — сильный ионно-электронный дрейф со скоростями порядка или больше скорости ионного звука. Изменение уровня геомагнитной возмущенности отражается на амплитудном масштабе спектра неоднородностей [Афраимович, Перевалова, 2006]: пропорционально возрастает амплитуда неоднородностей электронной концентрации всего диапазона масштабов — от метровых до километровых и более.

Необходимые для генерации мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации условия могут возникать и в среднеширотной ионосфере во время сильных геомагнитных возмущений [Афраимович et al., 2009] и при образовании спорадических слоев, характеризующихся резкими ионо-

сферными градиентами [Пашинцев, Гамов, 2002]. Область интенсификации мелкомасштабных неоднородностей на средних широтах чаще всего связана именно с авроральной активностью и имеет вид многомасштабного ионосферного возмущения, которое перемещается вслед за равномерно перемещающейся или пульсирующей южной границей аврорального овала. Длина переднего края такой области может составлять тысячи километров, глубина — сотни километров. На главной фазе геомагнитного возмущения пульсирующая граница аврорального овала может породить также крупномасштабную акустико-гравитационную волну (АГВ), которая, распространяясь на средние широты, «тянет» с собой область высоких ионосферных градиентов, порождающих мелкомасштабные возмущения электронной концентрации.

Еще один механизм формирования интенсивных мелкомасштабных неоднородностей на средних широтах — проникновение в эту область таких специфических ионосферных неоднородностей, как экваториальные плазменные пузыри (plasma bubbles) [Ma, Maruyama, 2006]. Поперечные размеры пузырей в большинстве случаев лежат в пределах 115–460 км [Smith, Heelis, 2017], электронная концентрация внутри пузыря снижена на 15–20 % относительно фона. Главным образом пузыри сосредоточены в пределах $\pm 20^\circ$ относительно геомагнитного экватора [Huang et al., 2011], однако имеются данные об их проникновении на средние широты до $\sim 34\text{--}38^\circ$ N [Ma, Maruyama, 2006; Demyanov et al., 2012b; Cherniak, Zakharenkova, 2016; Aa et al., 2018].

Нестабильность ионосферной плазмы на стенках пузыря, связанная с градиентами электронной концентрации, приводит к генерации мелкомасштабных неоднородностей, непосредственно ответственных за возникновение сильных ионосферных мерцаний радиосигналов. Наибольшая интенсивность мерцаний наблюдается в области магнитного зенита, т. е. тогда, когда лучевая траектория проходит вдоль силовой линии геомагнитного поля [Anderson, Straus, 2005] и, следовательно, по всей длине пузыря. Среднеквадратичные отклонения фазы σ_f [рад] и псевдодальности σ_R [м] связаны с уровнем мерцаний следующим образом [Kaplan, 1996; Conker et al., 2003]:

$$\sigma_R = L \times \sqrt{\frac{4F_1 d^2 \Delta F_{\text{DLL}}}{10^{0.1CN_0} \left(2(1-d) + \frac{4F_2 d}{T_{\text{COR}} \cdot 10^{0.1CN_0}} \right)}}, \quad (4)$$

$$\sigma_f = \left(160 \frac{\sigma_f f}{\Delta F_{\text{PLL}}} \right)^2 + \left(\frac{360}{2\pi} \right)^2 \times \frac{\Delta F_{\text{PLL}} \left(1 + \left[2T_{\text{COR}} \cdot 10^{0.1CN_0} (1 - S_4^2) \right]^{-1} \right)}{10^{0.1CN_0} (1 - S_4^2)}, \quad (5)$$

где $L = c/L_{\text{cod}}$ — длина волны дальномерного кода; c — скорость света; L_{cod} — длина дальномерного кода, имп/с; F_1, F_2 — параметры, зависящие от типов коррелятора и дискриминатора контура слежения за задержкой (типичные значения: $F_1 = 0.5, F_2 = 1$);

d — временная отстройка между опорными сигналами дискриминатора и сопровождаемым сигналом в долях длительности элемента дальномерного кода (типовые значения $d=(0.1 \div 0.5)t_{\text{имп}}$); ΔF_{DLL} , ΔF_{PLL} — шумовая полоса контура слежения за псевдозадержкой и псевдофазой соответственно; C/N_0 — отношение сигнал/шум на входе измерителя фазы и псевдозадержки, дБ Вт; T_{COR} — время накопления измерений в корреляторе, мс; σ_f — кратковременная нестабильность частоты опорного генератора приемника; f — несущая частота сигнала, Гц.

Рисунок 9 показывает зависимость среднеквадратичных отклонений оценок фазы и псевдодальности при фиксированном уровне сигнал/шум 40 дБ Вт на входе измерителя с использованием C/A-кода на частоте L1 при различном уровне амплитудных мерцаний (S_4). Видно, что мерцания амплитуды вызывают слабый линейный рост погрешности измерения фазы вплоть до уровня мерцаний $S_4 \sim 0.7$, а при более высоком уровне начинается резкий нелинейный рост погрешности. Погрешность измерения псевдодальности также возрастает приблизительно по линейному закону в области слабых мерцаний ($S_4 < 0.4$), но быстрее, чем погрешность измерения фазы. В области сильных мерцаний погрешность измерения дальности начинает нарастать нелинейно, но ее рост значительно меньше, чем рост погрешности измерения фазы при тех же значениях интенсивности мерцаний.

Известно, что устойчивость следящего за фазой измерителя сохраняется при выполнении условия $\sigma_f \leq 15^\circ$ [Kaplan, 1996]. Однако при усилении мерцаний растет минимальное значение отношения сигнал/шум на входе измерителя, необходимое для сохранения устойчивости фильтрации фазы. При слабых и умеренных мерцаниях с $S_4 \leq 0.4-0.5$ порог минимального отношения сигнал/шум увеличивается не более чем на 2–3 дБ Вт, а при более сильных мерцаниях его рост уже значителен: при $S_4 > 0.6$, например, 10–12 дБ Вт [Демьянов, Ясюкевич, 2014].

Для достижения наибольшей точности измерений фильтрация псевдозадержки выполняется в когерентном режиме, поэтому устойчивость измерений радионавигационных параметров определяется устойчивостью работы схемы слежения за фазой. Сбой слежения за фазой влечет резкое ухудшение точности оценивания псевдозадержки или срыв сопровождения сигнала навигационного спутника в целом. Формулы (4) и (5) указывают на то, что параметры настройки измерителя существенно влияют на устойчивость слежения за фазой несущей. Следовательно, адаптивная настройка следящего измерителя

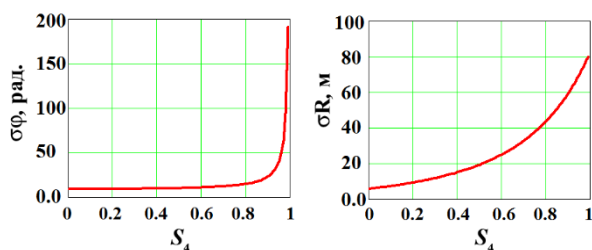


Рис. 9. Влияние амплитудных мерцаний на точность измерения фазы (слева) и псевдодальности (справа)

может оказаться одной из эффективных мер повышения устойчивости работы аппаратуры пользователей ГНСС в условиях действия ионосферных мерцаний.

3.2. Экспериментальные наблюдения воздействия мерцаний

В работе Vadakke et al. [2020] экспериментально показано, что погрешность оценки фазы несущей в схемах слежения за фазой может возрастать в 5–10 раз при воздействии ионосферных мерцаний. При этом интенсивность мерцаний и погрешность измерений фазы значительно различаются для сигналов разных спутников, принимаемых одной станцией. Это связано с локализацией неоднородностей и эффектом магнитного зенита при наблюдениях пузырей электронной концентрации. Например, во время появления экваториального пузыря на средних широтах именно спутники, находившиеся в области магнитного зенита, характеризовались наибольшими вероятностями срывов сопровождения фазы [Demyanov et al., 2012b].

Точность позиционирования в стандартном режиме также падает в условиях воздействия мерцаний. В работе [Linty et al., 2018] показано, что мерцания могут по крайней мере удваивать ошибку определения координат. При этом ошибки группируются в два непересекающихся кластера: первый соответствует спокойным условиям, а второй — наличию мерцаний. Это позволяет создавать алгоритмы детектирования указанных негативных событий.

Погрешность определения координат в режиме PPP в результате воздействия мерцаний, обусловленных экваториальными пузырями, может достигать нескольких метров [Moreno et al., 2011]. На рис. 10 можно видеть пример хорошей корреляции 3D-погрешности позиционирования и индекса амплитудных мерцаний S_4 в условиях низкоширотной ионосферы. При наблюдениях в высокоширотной ионосфере эффект снижения точности позиционирования из-за воздействия ионосферных мерцаний может

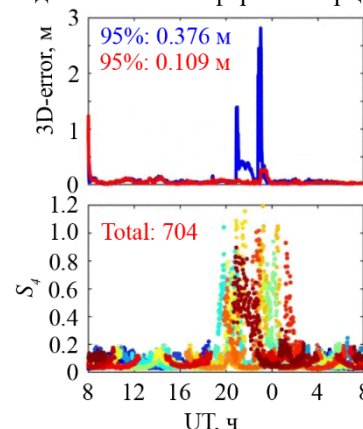


Рис. 10. Индекс амплитудных мерцаний S_4 на частоте L1 GPS (снизу) и 3D-ошибка позиционирования в режиме PPP (сверху) в стандартном режиме (синяя кривая) и с использованием коррекции методом динамических статистических весов (красная кривая). Данные для станции Гонконг 19 октября 2015 г. Часть рисунка из работы [Luo et al., 2020]

оказаться даже существеннее, чем на низких широтах, вследствие более плохой геометрии созвездия навигационных спутников на высоких широтах и, соответственно, более высоких значений DOP [Dabove et al., 2020].

Основными причинами ухудшения точности PPP в условиях ионосферных мерцаний являются срывы сопровождения сигналов отдельных спутников в связи с ухудшением геометрического фактора, аномальные дальномерные погрешности в составе навигационной функции, сбои в алгоритмах детектирования срывов измерения фазы (cycle slip) [Zhang et al., 2014]. Однако, как продемонстрировано выше (рис. 10), отбраковка измерений отдельных спутников, содержащих аномальные погрешности, и совершенствование внутренних алгоритмов целостности измерений (RAIM) значительно повышают устойчивость и точность решения задачи навигационных определений [Zhang et al., 2014; Vani et al., 2019].

4. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ГНСС В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОМ РЕЖИМЕ В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

4.1. Физические механизмы воздействия

Выделяют три основных типа систем дифференциальной коррекции и мониторинга целостности ГНСС: спутниковые (Satellite Based Augmentation System, SBAS), локальные (Local Based Augmentation Systems, LBAS) и наземные широкозонные (региональные) системы дифференциальной коррекции (Ground-Based Regional Augmentation System, GBAS). Наибольшее распространение получили широкозонные дифференциальные системы (ШДС) смешанного наземно-космического базирования (WAAS, EGNOS и др.) и системы локальной дифференциальной коррекции для обслуживания потребителей в режиме реального времени (Real Time Kinematic, RTK).

Воздействие экстремальных факторов космической погоды на пользователей ГНСС в дифференциальном режиме навигации имеет опосредованный характер — через качество дифференциальных поправок и достоверность предупреждений о доступности требуемых навигационных характеристик (ТНХ). Дифференциальные поправки к дальномерным погрешностям спутников ГНСС формируются путем декомпозиции реальных дальномерных погрешностей, измеренных по сигналам этих же спутников на сети опорных станций ШДС в моменты времени t_0 . С учетом только быстрых корректирующих поправок (чувствительных к экстремальным гелиогеофизическим событиям) коррекция псевдодальностей в текущий момент времени t_i относительно опорного времени t_0 осуществляется в аппаратуре пользователя следующим образом [GPS-WAAS-PS, 2008]:

$$PR_{i,COR} = PR_{i,REAL} + FC_i + RRC_i(t_0 - t_i) + IC_i + TC_i, \quad (6)$$

где $PR_{i,COR}$ и $PR_{i,REAL}$ — скорректированная и реальная псевдодальности; FC_i — «быстрые» поправки к

погрешностям, вызванным кратковременной нестабильностью бортового эталона времени и частоты спутника и селективным доступом (если он включен); RRC_i — поправка на скорость изменения дальности; IC_i — поправка на ионосферную дальномерную погрешность; TC_i — поправка на тропосферную дальномерную погрешность.

В формуле (6) ионосферный компонент погрешности IC_i оценивается на основе переработанных измерений наклонной ионосферной дальномерной погрешности, полученных на опорных станциях ШДС методом двухчастотных измерений [Hofmann-Wellenhof et al., 2001]. Предупреждения о доступности ТНХ формируются на основе оценок их уровней защиты (Protection Level, PL) в горизонтальной (HPL) и в вертикальной (VPL) плоскостях: текущая оценка уровней защиты не должна превышать максимально допустимую погрешность позиционирования в каждой плоскости. Если в аппаратуре пользователя обнаруживается обратное, то позиционирование пользователя с заданным уровнем ТНХ считается недоступным, о чем система выдает предупреждение всем пользователям в рабочей зоне.

В общем случае уровень защиты ТНХ PL рассчитывается на основании текущей геометрии созвездия навигационных спутников (относительно пользователя) и дисперсии соответствующих этим спутникам остаточных дальномерных погрешностей после применения дифференциальной коррекции (6) [GPS-WAAS-PS, 2008]:

$$PL = k D_{MJR}, \quad (7)$$

где k — коэффициент доверительной вероятности для допустимого интервала погрешности определения координат в заданной плоскости; D_{MJR} — след матрицы, содержащей комбинированные наблюдения геометрии наблюдаемого созвездия спутников и соответствующих им дальномерных погрешностей.

Как следует из формулы (7), в неблагоприятных гелиогеофизических условиях ухудшение работы ШДС в части формирования предупреждений о целостности границ ТНХ может вызываться тремя факторами:

1. Недоступностью или резким ухудшением точности корректирующей поправки на ионосферную погрешность (6), что приведет к увеличению дисперсии остаточной дальномерной погрешности, входящей в оценку D_{MJR} .
2. Подавлением сигналов навигационных спутников потоком радиоизлучения Солнца, что влечет ухудшение отношения сигнал/шум и соответствующее увеличение дисперсии измерений псевдодальности $PR_{i,COR}$ (6), входящей в D_{MJR} .
3. Срывом сопровождения сигналов части видимых спутников под воздействием радиоизлучения Солнца или мелкомасштабных возмущений ионосферы в пределах рабочей зоны ШДС, что приведет к ухудшению геометрии наблюдаемого созвездия спутников (и, соответственно, оценки D_{MJR}).

Следствием указанных явлений может стать повышенная вероятность ложной тревоги либо опасного рассогласования информации при формировании предупреждения о нарушении границ ТНХ в пределах рабочей зоны ШДС [Demyanov et al., 2019].

Первые два фактора относятся и к системам локальной дифференциальной коррекции в режиме коррекции псевдодальностей (RTK). Кроме того, эффективность локальных систем дифференциальной коррекции ограничена пространственно-временными градиентами ПЭС в пределах рабочей зоны системы [Warnant et al., 2007; Jacobsen, Schäfer, 2012].

4.2. Экспериментальные наблюдения

Во время экстремальных вспышек радиоизлучения Солнца могут наблюдаться серьезные нарушения в работе ШДС в части доступности требуемых навигационных характеристик в пределах рабочей зоны. Например, при формировании предупреждений о нарушении доступности ТНХ по требованиям авронавигации LPV200 (требования для захода на посадку с наведением в вертикальной плоскости до высоты принятия решения 200 футов) было обнаружено существенное сокращение области доступности этих ТНХ [Carrano et al., 2007]. Рисунок 11 показывает, что под воздействием экстремальной вспышки радиоизлучения Солнца 6 декабря 2006 г. размер рабочей зоны WAAS, в пределах которой ТНХ по требованиям LPV200 были доступны, в среднем сократился примерно в два раза. На рисунке представлена картина по данным Службы авронавигации под управлением Федеральной авиационной администрации США (FAA) [<https://www.nstb.tc.faa.gov/DisplayArchive.htm>].

Как сказано выше, системы локальной дифференциальной коррекции в большой степени подвержены и негативному воздействию возмущений ионосферы, вызванных магнитной бурей. Прежде всего, это касается значительного ограничения радиуса рабочей зоны. В спокойных условиях ионосферные градиенты ПЭС (в пересчете к единицам дальномерной погрешности) составляют ~1–3 мм/км. В возмущенных условиях эта величина может вырасти на два порядка и достигнуть 350 мм/км на средних

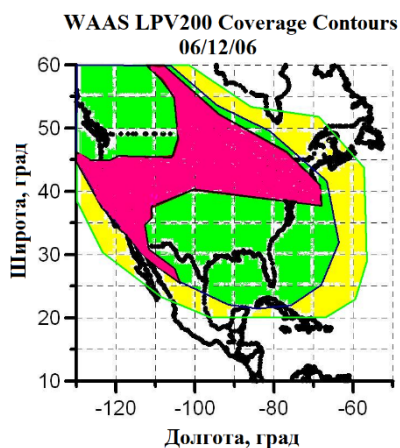


Рис. 11. Карта распределения предупреждений о нарушении границ требуемых навигационных характеристик для пользователей ШДС WAAS по требованиям LPV200 под действием экстремальной вспышки солнечного радиоизлучения 6 декабря 2006 г. Красным цветом показана область, в пределах которой ТНХ были недоступны, зеленым — ТНХ были доступны в течение >95 % времени наблюдений, желтым — ТНХ были доступны в течение <95 % времени наблюдений (на основе результатов [Carrano et al., 2007])

[Luo et al., 2004] и более 500 мм/км [Saito, Yoshihara, 2017] на экваториальных широтах. По причине высокой пространственно-временной изменчивости ионосферных дальномерных погрешностей в настоящее время размер рабочей зоны локальных дифференциальных систем стараются ограничить 100 км [Skone, Shrestha, 2002].

Известны данные о снижении качества высокоточного позиционирования при использовании режимов RTK и PPP в авроральных областях. Мелкомасштабные ионосферные возмущения, постоянно присутствующие в этой области, приводят к возникновению интенсивных ионосферных мерцаний и, как следствие, к ухудшению качества позиционирования. Данные, представленные на рис. 12, позволяют сравнить ухудшение точности позиционирования в режимах RTK и PPP вследствие сильных вариаций ПЭС и мерцаний фазы сигналов навигационных спутников. Наблюдения выполнены в условиях полярной ионосферы на станции мониторинга Tromsø 17 и 18 марта 2017 г. [Jacobsen, Schäfer, 2012; Jacobsen, Andalsvik, 2016]. Рост погрешности позиционирования (рис. 12, c) коррелирует с увеличением интенсивности неоднородностей электронной концентрации (рис. 12, b) и появлением фазовых мерцаний (рис. 12, a). Видно, что вследствие мерцаний погрешность позиционирования может увеличиваться на порядок относительно фонового уровня.

Следует отметить, что если область возмущений локализована и мерцания проявляются на малом числе лучей спутник–приемник, то даже без отбраковки этих измерений точность определения координат может оставаться на уровне невозмущенных условий. В частности, эксперименты по активному воздействию на ионосферу путем нагрева мощным коротковолновым излучением показали, что даже при наблюдении интенсивных неоднородностей на отдельных лучах спутник–приемник точность позиционирования как в стандартном двухчастотном режиме, так и в режиме PPP заметно не снижается и остается на фоновом уровне [Yasyukevich et al., 2020c].

5. ИНТЕНСИВНОСТЬ И ЧАСТОТА ПРОЯВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ, ОПАСНЫХ ДЛЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГНСС

5.1. Солнечные радиовспышки

Классификация, приведенная в работе [Huang et al., 2018], разделяет солнечные радиовспышки с основной частотой излучения 1415 МГц на пять классов: слабые (minor, класс G1, мощность потока радиоизлучения $S < 100$ с.е.п.), умеренные (moderate, G2, $100 < S < 1000$ с.е.п.), сильные (strong, G3, $1000 < S \leq 10000$ с.е.п.), опасные (severe, G4, $10000 < S \leq 100000$ с.е.п.), экстремальные (extreme, G5, $S > 100000$ с.е.п.).

За эпоху экспериментальных наблюдений наиболее мощный радиовсплеск наблюдался 6 декабря 2006 г.: по данным Owens Valley Solar Array, поток солнечного

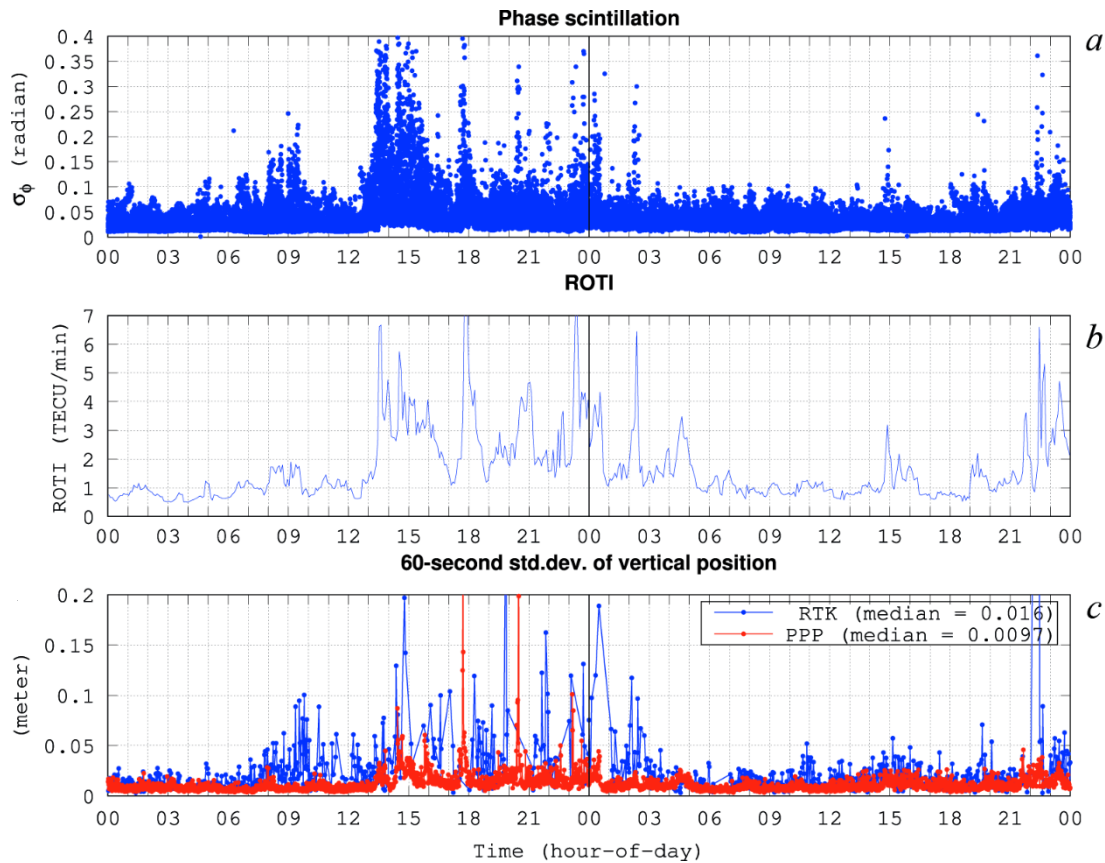


Рис. 12. Динамика мерцаний фазы сигналов GPS/ГЛОНАСС (a), индекса ROTI (b) и погрешности позиционирования в вертикальной плоскости (c) в режимах RTK (синяя кривая) и PPP (красная кривая) на ст. Tromsø 17 и 18 марта 2017 г. Рисунок заимствован из [Jacobsen, Andalsvik, 2016]

радиоизлучения превысил 10^6 с.е.п. на частоте 1.4 ГГц и достиг $6.5 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^5$ с.е.п. на частотах 1.2 и 1.6 ГГц соответственно [Cerruti et al., 2008]. При этом существует расхождение в данных различных радиотелескопов, что указывает на сложность интерпретации данных наблюдений солнечных радиовспышек [Cerruti et al., 2008]. Важно отметить, что наиболее мощный всплеск радиоизлучения произошел в минимуме 23/24-го цикла солнечной активности, т. е. мощность каждой конкретной радиовспышки прямо не связана с уровнем активности Солнца, что затрудняет их прогнозирование.

Huang et al. [2018], анализируя данные за 1997–2016 г., обнаружили 2384 вспышки мощностью >100 с.е.п. в L-диапазоне, из которых только 17 можно отнести к классу опасных и 4 — к классу экстремальных событий. Из оставшихся событий 1384 были отнесены к слабым и 859 — к умеренным. В 24-м цикле, в связи с общим более низким уровнем солнечной активности, чем в 23-м цикле, вероятность экстремальных и опасных событий значительно уменьшилась. Из событий 24-го цикла можно отметить радиовспышки 24 сентября 2011 г. [Sreeja et al., 2013] и 6 сентября 2017 г. [Berdermann et al., 2018; Yasyukevich et al., 2018], относящиеся по классификации [Huang et al., 2018] к экстремальным и опасным соответственно.

На основании результатов обработки годовых отчетов NOAA за 1960–2000 гг. [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/swpc_products/daily_reports/solar_event_repo

rts] и ежесуточных отчетов о состоянии активности Солнца в период 2000–2020 гг. [https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/radio-bursts/reports/fixed-frequency-listings] нами собрана статистика появления солнечных радиовспышек классов G2–G5. На рис. 13 представлена статистика наблюдения солнечных вспышек на частоте 1415 МГц начиная с 1960 г.: число дней в году, когда максимальная регистрируемая мощность опасного солнечного радиоизлучения соответствовала тому или иному классу вспышки. Приведены данные по количеству дней, когда максимум излучения соответствовал вспышкам классов G3 (оранжевая кривая, верхняя панель), G4 (красная кривая, верхняя панель), G2 (желтая кривая, нижняя панель) и G2–G5 (синяя кривая, нижняя панель); вертикальными темно-красными полосами отмечены годы, в которые наблюдались экстремальные вспышки класса G5.

В целом статистика наблюдений солнечных радиовспышек, включая представленную в [Giersch et al., 2017] и рассмотренную выше, показывает следующее: 1) частота появления радиовспышек существенно различается в разных диапазонах частот; 2) цикл солнечной активности не связан с частотой появления мощных радиовспышек и появление мощных радиовспышек не совпадает с максимумами солнечной активности; 3) частота появления солнечных радиовспышек падает с увеличением мощности вспышки, а экстремальные радиовспышки являются редкими, непериодическими и трудно предсказуемыми.

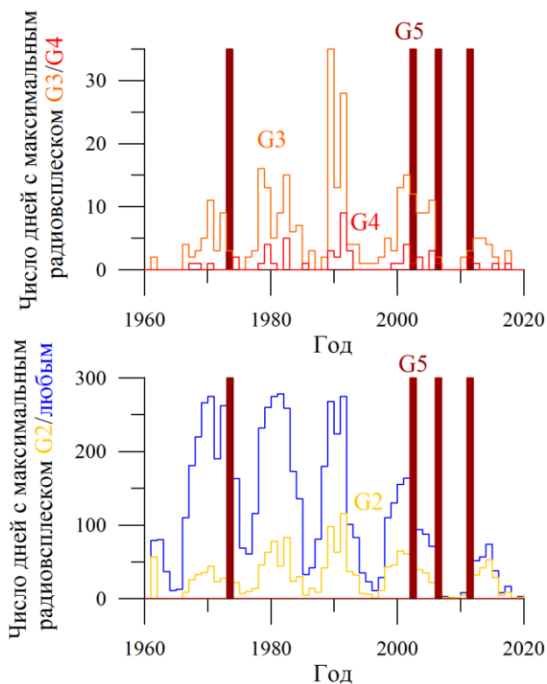


Рис. 13. Статистика наблюдений солнечных радиовспышек классов G2–G5 за период 1960–2020 гг.

Все это затрудняет прогнозирование опасных и, тем более, экстремальных радиовспышек на основе исторических данных. Тем не менее в работе [Huang et al., 2018] предложена статистическая степенная эмпирическая зависимость частоты события (радиовспышки в диапазоне частот ~1–2 ГГц) от его мощности:

$$F(S) = 37102 \cdot S^{-1.791}, \quad (8)$$

где S — мощность потока радиоизлучения предполагаемой вспышки. Например, при ожидаемой мощности $S \geq 4000$ с.е.п. частота событий составляет ~2.65 вспышки в год.

5.2. Магнитные бури

Общеприняты две независимые классификации магнитных бурь — по планетарному индексу геомагнитной активности K_p [Bartels et al., 1939] и по индексу Dst , отражающему вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля [Loewe, Prölss, 1997]: слабая буря — класс G1 ($K_p=5$, $Dst < -30$ нТл), умеренная буря — G2 ($K_p=6$, $Dst < -50$ нТл), сильная буря — G3 ($K_p=7$, $Dst < -100$ нТл), очень сильная буря — G4 ($K_p=8$, $Dst < -200$ нТл) и экстремальная буря — G5 ($K_p=9$, $Dst < -350$ нТл). Следует отметить, что классификация бурь по индексу Dst занижена по интенсивности относительно K_p . Так, среднее значение для максимального значения K_p составляет 4₀ для G1_{Dst}, 5₀ для G2_{Dst}, 7₋ для G3_{Dst}, 8₊ для G4_{Dst}, 9₋ для G5_{Dst} [Loewe, Prölss, 1997].

На основе результатов обработки базы данных OMNIweb [https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov; King, Papitashvili, 2005] за 1964–2020 гг. нами была собрана статистика возникновения магнитных бурь классов G1–G5.

На рис. 14 представлены графики, иллюстрирующие вероятность возникновения магнитных бурь каждого класса в году в указанный период. Стати-

стика магнитных бурь, классифицированных по индексу K_p , представлена на двух верхних, а по индексу Dst — на двух нижних панелях. Классы магнитных бурь обозначены цветами: G1 (синяя кривая); G2 (желтая); G3 (оранжевая); G4 (красные столбцы) и G5 (темно-красные столбцы).

Представленная статистика наблюдений показывает следующее: 1) вероятность возникновения магнитной бури падает с увеличением класса (т. е. мощности) бури; 2) для всех классов магнитных бурь существует явная периодичность в увеличении и уменьшении вероятности бури, которая имеет статистическую связь с циклическостью солнечной активности. Последнее обстоятельство упрощает прогнозирование мощных и экстремальных магнитных бурь на основе анализа долгопериодических наблюдений активности Солнца. За период экспериментальных наблюдений наиболее мощным событием в ближнем космосе считается буря Кэррингтона (1–2 сентября 1859 г.), во время которой, по оценкам, индекс Dst достиг -850 нТл [Siscoe et al., 2006].

В недавней работе Love et al. [2019] предполагается, что буря 15 мая 1921 г. могла быть даже более мощной, с $Dst = (-900 \pm 130)$ нТл. В космическую эру наиболее интенсивной являлась буря 13 марта 1989 г. ($Dst = -640$ нТл) [Lakhina et al., 2004]. В целом же, как видно из приведенной выше статистики наблюдений, экстремальные магнитные бури представляют собой достаточно редкие явления. Характер распределения частоты возникновения интенсивных бурь активно обсуждается. В частности, в работе [Riley, 2012] установлен степенной характер (с наклоном -3.2) интегральной функции распределения вероятности возникновения магнитной бури интенсивностью $Dst < -100$ нТл (рис. 15).

Дополнительные возможности для повышения точности прогноза магнитных бурь появляются благодаря новым исследованиям. Например, в работе [Lekshmi et al., 2011] на основе анализа данных за последние два цикла солнечной активности показано наличие «UT-эффекта» для сильных магнитных бурь: начало магнитной бури чаще всего соответствует 00:00 UT, хотя исчерпывающего объяснения этому эффекту пока нет.

Как сказано выше, основными (наиболее вероятными) драйверами бури являются магнитные облака, ассоциированные с корональными выбросами массы. Гораздо реже происходит развитие бури вследствие воздействия коротящих областей взаимодействия (CIR), поршней (ejecta) и области компрессии перед КВМ (sheath) [Yermolaev et al., 2013]. Например, вероятность возникновения магнитной бури с $Dst \sim -50$ нТл, обусловленной CIR, ejecta или sheath, в 3–4 раза ниже, чем магнитной бури такой же интенсивности, ассоциированной с КВМ. Для более мощных магнитных бурь с $Dst \sim -200$ нТл соответствующая вероятность ниже уже в 5–15 раз. В целом же можно констатировать, что техника предсказания магнитных бурь заданной интенсивности пока еще не удовлетворяет практическим требованиям и нуждается в дальнейшем совершенствовании.

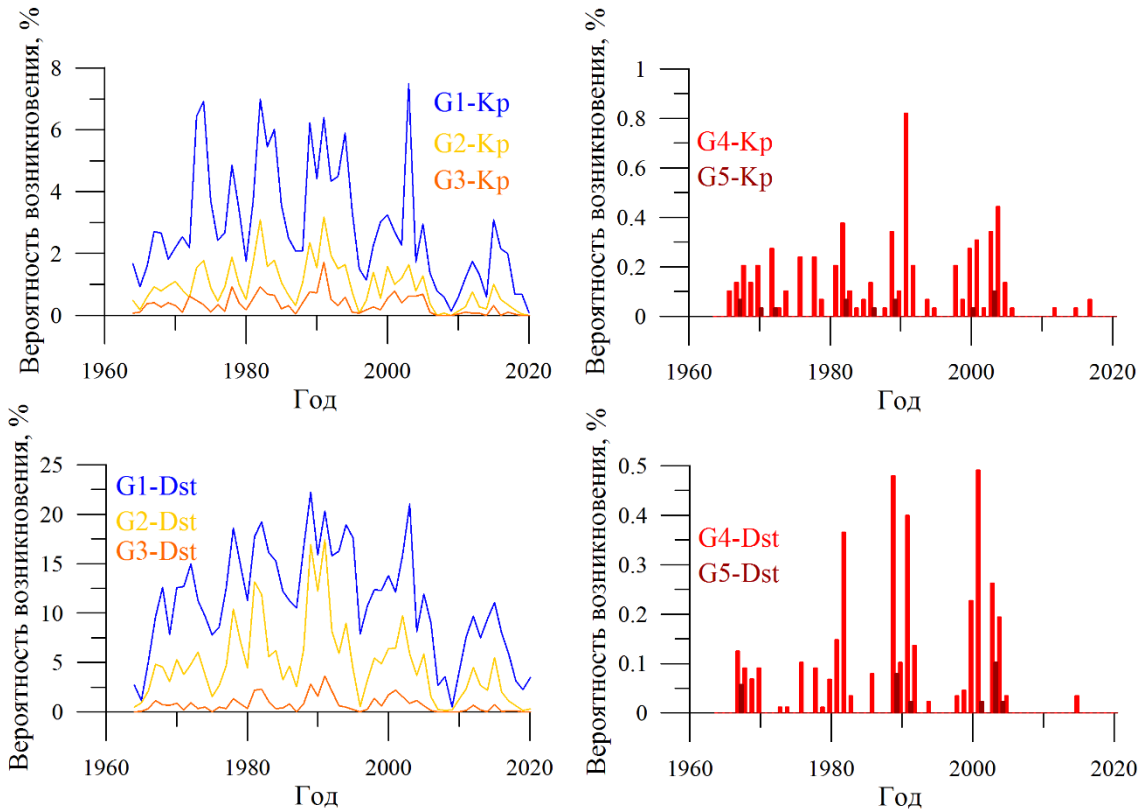


Рис. 14. Вероятность возникновения магнитных бурь классов G1–G3 (слева) и G4, G5 (справа) по годам в зависимости от индексов K_p (вверху) и Dst (внизу)

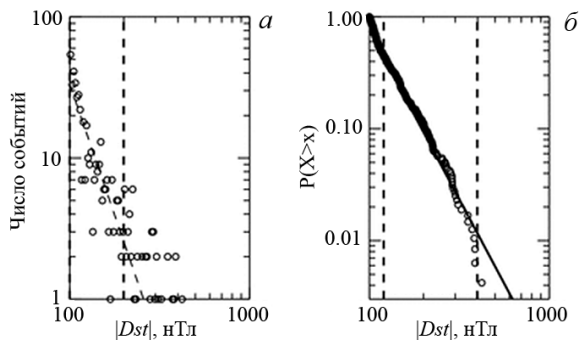


Рис. 15. Обнаруженное число магнитных бурь разной интенсивности (а) и интегральная функция распределения вероятности возникновения магнитной бури интенсивностью $X > x$ (б). Рисунок 8 из статьи [Riley, 2012]

ВЫВОДЫ

Приведенные выше сведения показывают, что экстремальные факторы космической погоды могут стать причиной существенного ухудшения качества функционирования ГНСС и их функциональных дополнений. Анализ проблемы позволяет наметить следующие направления совершенствования ГНСС:

- а) улучшение точности измерений радионавигационных параметров в условиях действия экстремальных факторов космической погоды;
- б) совершенствование контроля целостности системы и доступности требуемых навигационных характеристик пользователей ГНСС.

Улучшение точности измерения радионавигационных параметров предполагает максимальное уменьшение систематической и случайной погреш-

ностей измерения фазы или псевдозадержки в условиях действия геомагнитных возмущений, ионосферных неоднородностей и мощных солнечных радиовсплесков. В автономном режиме навигации это может быть достигнуто следующими путями:

- 1) использованием моделей или оперативно-обновляемых карт для коррекции ионосферных дальномерных погрешностей;
- 2) адаптивной настройкой следящих измерителей радионавигационных параметров;
- 3) снижением тепловых шумов радиотракта навигационного приемника и, как следствие, уменьшением порогового отношения сигнал/шум, определяющего устойчивость сопровождения радионавигационного параметра и точность его измерений;
- 4) использованием кодов дальномерных измерений, обладающих лучшими кросс-корреляционными свойствами и потенциальной точностью измерений.

Мероприятия 1 и 4 обеспечивают уменьшение систематической погрешности дальномерных измерений и повышают их потенциальную точность. При этом использование моделей ионосферной дальномерной погрешности далеко не всегда достаточно эффективно даже в спокойных условиях, не говоря об условиях геомагнитных бурь. Альтернативой может быть использование локальных или глобальных/региональных карт ПЭС, обновляемых в масштабе времени, близком к реальному [Li et al., 2020].

Новыми поколениями навигационных спутников ГНСС излучаются сигналы дальномерного кода с более совершенной структурой. В частности, в состав

сигналов ГНСС GPS добавлено два новых «гражданских» сигнала на частотах L2 (L2C) и L5. Таким образом, новым поколением спутников GPS излучаются общедоступные сигналы на трех частотах: L1 (1575.42 МГц), L2 (1227.6 МГц) и L5 (1176.45 МГц). Расширение набора сигналов дает большие возможности для снижения погрешностей дальномерных измерений в условиях действия экстремальных гелиогеофизических факторов: сигнал L1 имеет самую малую рефракционную погрешность, сигнал L5 характеризуется повышенной мощностью, сигналы L2C и L5 содержат дальномерные коды большой длины (в 10 раз больше, чем код C/A), что обеспечивает улучшение кросс-корреляционных свойств сигнала, в том числе в условиях многолучевости и низкого отношения сигнал/шум.

Мероприятия 2 и 3 могут стать эффективными мерами по уменьшению случайной погрешности измерений радионавигационных параметров. Эти меры будут эффективны при апостериорном мониторинге точности и непрерывности измерений параметров сигнала с учетом заданных гелиогеофизических условий. Оптимальная настройка следящего измерителя с возможностью его адаптации требует предварительных статистически значимых наблюдений времени стационарности измеряемых параметров в условиях действия интенсивных ионосферных мерцаний. При этом надо учитывать, что адаптивная настройка следящих измерителей имеет ограничения при установке навигационного приемника на высокодинамичные объекты (летательные аппараты, скоростной наземный транспорт).

Факторы космической погоды являются главной причиной ухудшения качества работы дифференциального режима навигации, причем их воздействие существенно как на широкозонные, так и на локальные дифференциальные системы. Тем не менее, для решения задач высокоточной навигации в условиях действия экстремальных факторов космической погоды рекомендуется приоритетное использование локальных дифференциальных систем. Повысить устойчивость функционирования широкозонных дифференциальных систем можно путем привлечения измерений доступных опорных станций локальных дифференциальных систем, а также сетей геофизического и геодезического мониторинга (IGS, CORS и пр.).

Весьма актуальное направление модернизации ГНСС состоит в совершенствовании контроля целостности системы и контроля доступности требуемых навигационных характеристик с учетом воздействия факторов космической погоды. Можно рекомендовать следующие технические мероприятия:

- 1) модернизацию алгоритмов автономного контроля целостности (RAIM) с внедрением решений, учитывающих текущую гелиогеофизическую обстановку;
- 2) модернизацию алгоритмов контроля доступности требуемых навигационных характеристик пользователей ГНСС в дифференциальном режиме навигации с внедрением решений, учитывающих текущую гелиогеофизическую обстановку;
- 3) совершенствование технологий долгосрочного и оперативного прогноза доступности требуемых

навигационных характеристик пользователей ГНСС на период гелиогеомагнитного возмущения.

Для дополнения алгоритма контроля целостности RAIM можно рекомендовать непрерывный мониторинг индекса мерцаний S_4 в канале сопровождения сигналов каждого спутника ГНСС. Величина индекса мерцаний в канале сопровождения конкретного спутника может оказаться эффективным индикатором состояния при оперативном контроле целостности измерений в условиях геомагнитных возмущений и может использоваться для исключения дальномерных измерений тех спутников, для которых обнаруживаются сильные мерцания ($S_4 > 0.6$), из процесса решения навигационной задачи. При этом остается открытым вопрос об оптимальном времени накопления измерений для оценки индекса S_4 в зависимости от интенсивности и вида гелиогеофизического события, средней мощности сигнала в точке приема и параметров кодовой дальномерной последовательности.

Модернизация алгоритмов контроля доступности ГНСС пользователей широкозонных дифференциальных систем должна быть ориентирована на совершенствование процесса формирования ионосферной компоненты дифференциальной коррекции. Можно рекомендовать раздельное формирование глобально- и локально-зависимых дифференциальных поправок к дальномерным погрешностям за счет привлечения для оценки последних доступных средств локальных дифференциальных систем и данных сетей геофизических/геодезических измерений. В частности, использование выборочных оценок ионосферных дальномерных погрешностей, полученных указанными средствами, приведет к существенному снижению вероятности ложной тревоги и опасного несогласования информации в работе алгоритма контроля доступности требуемых навигационных характеристик пользователей широкозонных дифференциальных систем.

Долговременный и оперативный прогнозы доступности требуемых навигационных характеристик на период гелиогеомагнитного возмущения являются наиболее спорными и сложными направлениями модернизации ГНСС. Выше продемонстрировано, что экстремальные гелиогеомагнитные явления могут вызывать серьезное ухудшение работы ГНСС, однако прямой функциональной зависимости здесь не существует. Прежде всего, следует разделить задачи прогнозирования воздействий солнечных радиовсплесков и мощных геомагнитных возмущений на работу ГНСС. Одним из путей повышения достоверности прогнозов может стать выработка системы индексов геомагнитной активности, имеющих наилучшую корреляцию с характеристиками качества функционирования ГНСС.

Современное состояние исследований механизмов формирования всплесков радиоизлучения Солнца не позволяет достаточно точно выполнять долгосрочное прогнозирование опасных всплесков радиоизлучения Солнца в интересах пользователей ГНСС. Пока единственной рекомендуемой мерой может быть непрерывный радиомониторинг Солнца с выдачей оперативного предупреждения пользова-

телям при появлении всплесков радиоизлучения мощностью $>10^3$ с.е.п.

Долгосрочный прогноз опасных для функционирования ГНСС геомагнитных явлений должен базироваться на надежном прогнозировании собственно геомагнитных возмущений. Это сложная научная проблема, которая сегодня еще далека от решения на уровне, достаточном для надежного прогнозирования качества работы ГНСС в условиях магнитных бурь. Для ее успешного решения требуется развертывание мировой службы мониторинга состояния Солнца и глобальной системы прогноза космической погоды (по аналогии с интеграцией средств навигации наземного и космического базирования в рамках всемирной системы ГНСС). Такая служба должна быть подкреплена научной инфраструктурой, включающей инструменты и средства мониторинга нового поколения [Жеребцов, 2020].

В заключение отметим, что уже существуют практически все элементы, необходимые для развертывания комплексной системы мониторинга и обеспечения требуемых навигационных характеристик ГНСС (и их функциональных дополнений) в условиях воздействия неблагоприятных гелиогеофизических факторов. В перспективе необходимо создать службу глобального мониторинга и прогноза текущего качества функционирования ГНСС с учетом действия экстремальных факторов космической погоды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-15-50079. Авторы выражают благодарность Д.А. Затолокину и F. Zhou за программное обеспечение для проведения расчетов координат и особую признательность за использование данных сервиса OMNI-Web Центра данных по физике космоса NASA/GSFC, OMNI и Международной службе ГНСС (IGS).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акасофу С.И., Чепмен С. *Солнечно-земная физика*. М.: Мир, 1975. Т. 2. 512 с.
- Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ ВХС ВСНЦ СО РАН, 2006. 479 с.
- Афраймович Э.Л., Лесюта О.С., Ушаков И.И. Геомагнитные возмущения и функционирование навигационной системы GPS. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2002. Т. 42, № 2. С. 220–227.
- Афраймович Э.Л., Гаврилюк Н.С., Демьянов В.В. и др. Сбой функционирования спутниковых навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2003 г. *Космические исследования*. 2009. Т. 47, № 2. С. 146–157.
- Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. Геомагнитные вариации и бури. Новосибирск: Наука, 1979. 287 с.
- Барабанова Л.П. К минимизации геометрических факторов GNSS. *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2010. № 2. С. 145–152.
- Бруцек А., Дюржан Ш. *Солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов*. М.: Мир, 1980. 256 с.
- Вдовин В.С., Дворкин В.В., Карпик А.П. и др. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF. *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. 2018. Т. 23, № 1. С. 6–27.

Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. *Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем*: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. 349 с.

Жеребцов Г.А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 6–18. DOI: [10.12737/szf-62202001](https://doi.org/10.12737/szf-62202001).

Затолокин Д.А. *Программа решения навигационной задачи ГНСС «Navi»: свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ № 2020612010*. 2020.

Захаров В.И., Чернышов А.А., Милох В. Джин Я. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 6. С. 769–782. DOI: [10.31857/S0016794020060152](https://doi.org/10.31857/S0016794020060152).

ИКД СДКМ. *Система дифференциальной коррекции и мониторинга (редакция 1)*. 2012. 133 с.

Кравцов А.Ю. *Прохождение радиоволн через ионосферу Земли*. М.: Радио и связь, 1983. 224 с.

Пашинцев В.П., Гамов М.В. Влияние дисперсионной ионосферы на измерение псевдодалности в спутниковых радионавигационных системах. *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 2002. № 12. С. 3–13.

Пашинцев В.П., Ахмадеев Р.Р. Прогнозирование помехоустойчивости спутниковых радиосистем по данным GPS-мониторинга ионосферы. *Электросвязь*. 2015. № 11. С. 58–65.

Харгривс Дж.К. *Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи*. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 351 с.

Яковлев О.И. *Космическая радиофизика*. Воронеж: Научная книга, 1998. 432 с.

Aa E., Huang W., Liu S., et al. Midlatitude plasma bubbles over China and adjacent areas during a magnetic storm on 8 September 2017. *Space Weather*. 2018. Vol. 16. P. 321–331. DOI: [10.1002/2017SW001776](https://doi.org/10.1002/2017SW001776).

Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. of the IEEE*. 1982. Vol. 70, iss. 4. P. 360–378. DOI: [10.1109/PROC.1982.12314](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12314).

Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Ishin A.B., Smolkov G.Ya. Powerful solar radio bursts as a global and free tool for testing satellite broadband radio systems, including GPS–GLONASS–GALILEO. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70, iss. 15. P. 1985–1994. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.09.008](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.008).

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Gamayunov I.F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 43, iss. 6. P. 964–972. DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.015).

Anderson P.C., Straus P.R. Magnetic field orientation control of GPS occultation observations of equatorial scintillation. *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32, L21107. DOI: [10.1029/2005GL023781](https://doi.org/10.1029/2005GL023781).

Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems. *Space Weather*. 2014. Vol. 12, no. 7. P. 508–525. DOI: [10.1002/2014SW001072](https://doi.org/10.1002/2014SW001072).

Bartels J., Heck N.H., Johnston H.F. The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*. 1939. Vol. 44, no. 4. P. 411–454. DOI: [10.1029/TE044i004p00411](https://doi.org/10.1029/TE044i004p00411).

BDS-SIS-ICD. *BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document: Open Service Signal B1I (Version 3.0)*. 2019. BDS-SIS-ICD-B1I-3.0. 2019-02.

Berdermann J., Kriegel M., Banyás D., et al. Ionospheric response to the X9.3 Flare on 6 September 2017 and its implication for navigation services over Europe. *Space Weather*. 2018. Vol. 16, iss. 10. P. 1604–1615. DOI: [10.1029/2018SW001933](https://doi.org/10.1029/2018SW001933).

Berghmans D., Van der Linden R.A.M., Vanlommel P., Warnant R., et al. Solar activity: nowcasting and forecasting at the SIDC. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23, no. 6. P. 3115–3128. DOI: [10.5194/angeo-23-3115-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-3115-2005).

Bhattacharyya A., Yen K.C., Franke S.J. Deducing turbulence parameters from transionospheric scintillation

- measurements. *Space Sci. Rev.* 1992. Vol. 61. P. 335–386. DOI: [10.1007/BF0022311](https://doi.org/10.1007/BF0022311).
- Bruyninx C., Habrich H., Söhne W., et al. Enhancement of the EUREF Permanent Network Services and Products. *Geodesy for Planet Earth. IAG Symposia Series*. 2012. Vol. 136. P. 27–35. DOI: [10.1007/978-3-642-20338-1_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20338-1_4).
- Carrano C.S., Groves K.M., Bridgwood C.T. Effects of the December 2006 Solar Radio Bursts on the GPS Receivers of the AFRL-SCINDA Network. *Proceedings of the International Beacon Satellite Symposium*, Boston College. June 11–15, 2007.
- Carrano C.S., Bridgwood C.T., Groves K.M. Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS. *Radio Sci.* 2009. Vol. 44, RS0A25. DOI: [10.1029/2008RS004071](https://doi.org/10.1029/2008RS004071).
- Cerruti A.P., Kintner P.M., Gary D.E., et al. Observed Solar Radio Burst Effects on GPS/WAAS Carrier-to-Noise Ratio. *Space Weather*. 2006. Vol. 4, S10006. DOI: [10.1029/2006SW000254](https://doi.org/10.1029/2006SW000254).
- Cerruti A.P., Kintner P.M., Gary D.E. Effect of intense December 2006 solar radio bursts on GPS receivers. *Space Weather*. 2008. Vol. 6, S10D07. DOI: [10.1029/2007SW000375](https://doi.org/10.1029/2007SW000375).
- Chen Z., Gao Y., Liu Z. Evaluation of solar radio bursts' effect on GPS receiver signal tracking within International GPS Service network. *Radio Sci.* 2005. Vol. 40, RS3012. DOI: [10.1029/2004RS003066](https://doi.org/10.1029/2004RS003066).
- Cherniak I., Zakharenkova I. First observations of super plasma bubbles in Europe. *Geophys. Res. Lett.* 2016. Vol. 43, no. 21. P. 11137–11145. DOI: [10.1002/2016GL071421](https://doi.org/10.1002/2016GL071421).
- Conker R.S., El-Arini M.B., Hegarty C.J., Hsiao T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based Augmentation System availability. *Radio Sci.* 2003. Vol. 38, no. 1, 1001. DOI: [10.1029/2000RS002604](https://doi.org/10.1029/2000RS002604).
- Coster A.J., Foster J.C., Erickson P.J., Rich F.J. Regional GPS mapping of storm enhanced density during the July 15–16 2000 geomagnetic storm. *Proceedings of International Beaco Satellite Symposium, June 4–6, 2001* / Boston College; Institute for Scientific Research. USA: Chestnut Hill, MA. 2001. P. 176–180.
- Dabov P., Linty N., Dovic F. Analysis of multi-constellation GNSS PPP solutions under phase scintillations at high latitudes. *Appl. Geomatics*. 2020. Vol. 12. P. 45–52. DOI: [10.1007/s12518-019-00269-4](https://doi.org/10.1007/s12518-019-00269-4).
- Demyanov V.V., Afraimovich E.L., Jin S. An evaluation of potential solar radio emission power threat on GPS and GLONASS performance. *GPS Solutions*. 2012a. Vol. 16. P. 411–424. DOI: [10.1007/s10291-011-0241-9](https://doi.org/10.1007/s10291-011-0241-9).
- Demyanov V.V., Yasyukevich Y.V., Ishin A.B., et al. Ionospheric super-bubble effects on the GPS positioning relative to the orientation of signal path and geomagnetic field direction. *GPS Solutions*. 2012b. Vol. 16. P. 181–189. DOI: [10.1007/s10291-011-0217-9](https://doi.org/10.1007/s10291-011-0217-9).
- Demyanov V.V., Zhang X., Lu X. Moderate geomagnetic storm condition, WAAS Alerts and real GPS positioning quality. *J. Atmos. Sci. Res.* 2019. Vol. 2, no. 1. P. 10–23. DOI: [10.30564/jasr.v2i1.343](https://doi.org/10.30564/jasr.v2i1.343).
- 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. P. 191–198. DOI: [10.1007/s0019000803003](https://doi.org/10.1007/s0019000803003).
- Dulk A.G. Radio emission from the Sun and stars. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1985. Vol. 23. P. 169–224. DOI: [10.1146/annurev.aa.23.090185.001125](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.23.090185.001125).
- Falcone M., Lucas R., Burger T., Hein G.W. The European Galileo programme. *The European EGNOS project*. ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands, SP-1303. 2006. P. 435–455.
- Freymueller J.T. AEIC (Kodiak) 2014. *GPS/GNSS Observations Dataset*. The GAGE Facility operated by UNAVCO, Inc., 2017.
- GPS-WAAS-PS. *Global Positioning System Wide Area Augmentation System (WAAS) Performance Standard*. 2008–10.
- Giersch O.D., Kennewell J., Lynch M. Solar radio burst statistics and implications for space weather effects. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 1511–1522. DOI: [10.1002/2017SW001658](https://doi.org/10.1002/2017SW001658).
- GPS-WAAS-PS. *Global Positioning System Wide Area Augmentation System (WAAS) Performance Standard*. 2008. GPS WAAS PS. 2008–10.
- Gulyaeva T.L., Gulyaev R.A. Chain of responses of geomagnetic and ionospheric storms to a bunch of central coronal hole and high speed stream of solar wind. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2020. Vol. 208, 105380. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105380](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105380).
- Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *J. Geodesy*. 2009. Vol. 83, no. 3. P. 263–275. DOI: [10.1007/s00190-008-0266-1](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1).
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. 5th edition. New York: Springer-Verlag, 2001. 406 p. DOI: [10.1007/987-3-7091-6199-9](https://doi.org/10.1007/987-3-7091-6199-9).
- Huang C.-S., de La Beaujardiere O., Roddy P.A., et al. Evolution of equatorial ionospheric plasma bubbles and formation of broad plasma depletions measured by the C/NOFS satellite during deep solar minimum. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2011. Vol. 116, A03309. DOI: [10.1029/2010JA015982](https://doi.org/10.1029/2010JA015982).
- Huang W., Aa E., Shen H., Liu S. Statistical study of GNSS L-band solar radio bursts. *GPS Solutions*. 2018. Vol. 22, 114. DOI: [10.1007/s10291-018-0780-4](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0780-4).
- Jacobsen K.S., Schäfer S. Observed effects of a geomagnetic storm on an RTK positioning network at high latitudes. *J. Space Weather Space Climate*. 2012. Vol. 2, A13. DOI: [10.1051/swsc/2012013](https://doi.org/10.1051/swsc/2012013).
- Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L. Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway. *J. Space Weather and Space Climate*. 2016. Vol. 6, A9. DOI: [10.1051/swsc/2016004](https://doi.org/10.1051/swsc/2016004).
- Jayachandran P.T., Langley R.B., MacDougall J.W., et al. Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN). *Radio Sci.* 2009. Vol. 44, no. 1, RS0A03. DOI: [10.1029/2008RS004046](https://doi.org/10.1029/2008RS004046).
- Jin S., Cardellach E., Xie F. GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications. *Remote Sensing and Digital Image Processing*. 2014. Vol. 19. 276 p. DOI: [10.1007/978-94-007-7482-7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7482-7).
- Kaplan E.D. *Understanding GPS: principles and applications*. 1996. 556 p.
- King J.H., Papitashvili N.E. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2005. Vol. 110, no. A2, A02104. DOI: [10.1029/2004JA010649](https://doi.org/10.1029/2004JA010649).
- Klobuchar J.A., Kunches J.M., Van Dierendonck A.J. Eye on the ionosphere: Potential solar radio burst effects on GPS signal to noise. *GPS Solutions*. 1999. Vol. 3, no. 2. P. 69–71. DOI: [10.1007/PL00012794](https://doi.org/10.1007/PL00012794).
- Kolesnik S.N., Tinin M.V., Afanasiev N.T. Statistical characteristics of a wave propagating through a layer with random irregularities. *Waves in Random Media*. 2002. Vol. 12. P. 417–431. DOI: [10.1088/0959-7174/12/4/302](https://doi.org/10.1088/0959-7174/12/4/302).
- Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Zakharov V.I., Engebretson M.J. GPS-TEC response to the substorm onset during April 5, 2010, magnetic storm. *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21, no. 3. P. 927–936. DOI: [10.1007/s10291-016-0581-6](https://doi.org/10.1007/s10291-016-0581-6).
- Lakhina G., Alex S., Tsurutani B., Gonzalez W. Research on Historical Records of Geomagnetic Storms. *Proceedings of the International Astronomical Union (IAUS226)*. 2004. P. 3–15. DOI: [10.1017/S1743921305000074](https://doi.org/10.1017/S1743921305000074).
- Lekshmi V.D., Balan N., Tulasi S.R., Liu J.-Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2011. Vol. 116, A11328. DOI: [10.1029/2011JA017042](https://doi.org/10.1029/2011JA017042).
- Li Z., Wang N., Hernández-Pajares M., et al. IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling. *J. Geodesy*. 2020. Vol. 94, 32. DOI: [10.1007/s00190-020-01360-0](https://doi.org/10.1007/s00190-020-01360-0).

- Linty N. *Codeless tracking algorithms for GNSS software receivers: Tesi di Laurea Magistrale*. Torino, 2010. 126 p.
- Linty N., Minetto A., Dovis F., Spogli L. Effects of phase scintillation on the GNSS positioning error during the September 2017 storm at Svalbard. *Space Weather*. 2018. Vol. 16. P. 1317–1329. DOI: [10.1029/2018SW001940](https://doi.org/10.1029/2018SW001940).
- Loewe C.A., Pröls G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, A7. P. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).
- Love J.J., Hayakawa H., Cliver E.W. Intensity and impact of the New York Railroad superstorm of May 1921. *Space Weather*. 2019. Vol. 17. P. 1281–1292. DOI: [10.1029/2019SW002250](https://doi.org/10.1029/2019SW002250).
- Luo M., Pullen S., Ene A., et al. Ionosphere threat to LAAS: updated model, user impact, and mitigations. *17th International Technical Meeting of the Satellite Division (ION-GNSS 2004)*. Long Beach, CA, 2004. P. 2771–2785.
- Luo X., Gu S., Lou Y., et al. Assessing the performance of GPS precise point positioning under different geomagnetic storm conditions during solar cycle 24. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 6, 1784. DOI: [10.3390/s18061784](https://doi.org/10.3390/s18061784).
- Luo X., Gu S., Lou Y., Song W. Better thresholds and weights to improve GNSS PPP under ionospheric scintillation activity at low latitudes. *GPS Solutions*. 2020. Vol. 24, 17. DOI: [10.1007/s10291-019-0924-1](https://doi.org/10.1007/s10291-019-0924-1).
- Ma G., Maruyama T. A super bubble detected by dense GPS network at East Asian longitudes. *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33, no. 21, L21103 DOI: [10.1029/2006GL027512](https://doi.org/10.1029/2006GL027512).
- McCaffrey A.M., Jayachandran P.T. Spectral characteristics of auroral region scintillation using 100 Hz sampling. *GPS Solutions*. 2017. Vol. 21. P. 1883–1894. DOI: [10.1007/s10291-017-0664-z](https://doi.org/10.1007/s10291-017-0664-z).
- Michalek G., Puchowska K., Rams A. Statistical analysis of decimetric radio bursts, flares and coronal mass ejections. *Solar Phys.* 2009. Vol. 257. P. 113–124. DOI: [10.1007/s11207-009-9343-8](https://doi.org/10.1007/s11207-009-9343-8).
- Moreno B., Radicella S., de Lacy M.C., et al. On the effects of the ionospheric disturbances on precise point positioning at equatorial latitudes. *GPS Solutions*. 2011. Vol. 15, no. 4. P. 381–390. DOI: [10.1007/s10291-010-0197-1](https://doi.org/10.1007/s10291-010-0197-1).
- Psiaki M.L. Block acquisition of weak GPS signals in a software receiver. *Proc. ION GPS 2001*. Salt Lake City, UT, September 11–14, 2001. P. 2838–2850.
- Riley P. On the probability of occurrence of extreme space weather events. *Space Weather*. 2012. Vol. 10, S02012. DOI: [10.1029/2011SW000734](https://doi.org/10.1029/2011SW000734).
- Rino C.L. *The Theory of Scintillation with Applications in Remote Sensing*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 230 p. DOI: [10.1002/9781118010211](https://doi.org/10.1002/9781118010211).
- Rodríguez-Bilbao I., Radicella S.M., Rodríguez-Caderot G., Herraiz M. Precise point positioning performance in the presence of the 28 October 2003 sudden increase in total electron content. *Space Weather*. 2015. Vol. 13. P. 698–708. DOI: [10.1002/2015SW001201](https://doi.org/10.1002/2015SW001201).
- Saito S., Yoshihara T. Evaluation of extreme ionospheric total electron content gradient associated with plasma bubbles for GNSS Ground-Based Augmentation System. *Radio Sci.* 2017. Vol. 52. P. 951–962. DOI: [10.1002/2017RS006291](https://doi.org/10.1002/2017RS006291).
- Shi C., Liu J. GNSS status and developments in China. *Civil Global Positioning System Service Interface Committee, 46th meeting*. Fort Worth, Texas, September 26. 2006.
- Siscoe G., Crooker N.U., Clauer C. Dst of the Carrington storm of 1859. *Adv. Space Res.* 2006. Vol. 38, no. 2. P. 173–179. DOI: [10.1016/j.asr.2005.02.102](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.02.102).
- Skone S., Shrestha S.M. Limitations in DGPS positioning accuracies at low latitudes during solar maximum. *Geophys. Res. Lett.* 2002. Vol. 29, no. 10. P. 81–1–81–4. DOI: [10.1029/2001GL013854](https://doi.org/10.1029/2001GL013854).
- Smith J., Heelis R.A. Equatorial plasma bubbles: Variations of occurrence and spatial scale in local time, longitude, season, and solar activity. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. Vol. 122. P. 5743–5755. DOI: [10.1002/2017JA024128](https://doi.org/10.1002/2017JA024128).
- Sreeja V., Aquino M., Jong K. Impact of the 24 September 2011 solar radio burst on the performance of GNSS receivers. *Space Weather*. 2013. Vol. 11. P. 306–312. DOI: [10.1002/swe.20057](https://doi.org/10.1002/swe.20057).
- Vadakke S.V., Aquino M., Marques H.A., et al. Mitigation of ionospheric scintillation effects on GNSS precise point positioning (PPP) at low latitudes. *J. Geodesy*. 2020. Vol. 94, 15. DOI: [10.1007/s00190-020-01345-z](https://doi.org/10.1007/s00190-020-01345-z).
- Vani B.C., Forte B., Monico J.F.G., et al. A Novel Approach to Improve GNSS Precise Point Positioning During Strong Ionospheric Scintillation: Theory and Demonstration. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2019. Vol. 68, no. 5. P. 4391–4403. DOI: [10.1109/TVT.2019.2903988](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2903988).
- Warnant R., Lejeune S., Bavier M. Space weather influence on satellite-based navigation and precise positioning. *Space Weather*. 2007. Vol. 344. P. 129–146. DOI: [10.1007/1-4020-5446-7_14](https://doi.org/10.1007/1-4020-5446-7_14).
- Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A., et al. 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. P. 1013–1027. DOI: [10.1029/2018SW001932](https://doi.org/10.1029/2018SW001932).
- Yasyukevich Yu.V., Kiselev A.V., Zhivetiev I.V., et al. SIMuRG: System for Ionosphere Monitoring and Research from GNSS. *GPS Solutions*. 2020a. Vol. 24, 69. DOI: [10.1007/s10291-020-00983-2](https://doi.org/10.1007/s10291-020-00983-2).
- Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratovsky K. 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*. 2020b. Vol. 12, no. 10. P. 1579. DOI: [10.3390/rs12101579](https://doi.org/10.3390/rs12101579).
- Yasyukevich Yu.V., Syrovatskiy S.V., Padokhin A.M., et al. GPS positioning accuracy in different modes with active forcing on the ionosphere from the SURA high-power HF radiation. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2020c. Vol. 62. P. 807–819. DOI: [10.1007/s11141-020-10026-y](https://doi.org/10.1007/s11141-020-10026-y).
- Yasyukevich Yu.V., Yasyukevich A.S., Astafyeva E.I. How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts. *GPS Solutions*. 2021. Vol. 25, 46. DOI: [10.1007/s10291-021-01091-5](https://doi.org/10.1007/s10291-021-01091-5).
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Y. Occurrence rate of extreme magnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. Vol. 118. P. 4760–4765. DOI: [10.1002/jgra.50467](https://doi.org/10.1002/jgra.50467).
- Zhang X., Guo F., Zhou P. Improved precise point positioning in the presence of ionospheric scintillation. *GPS Solutions*. 2014. Vol. 18. P. 51–60. DOI: [10.1007/s10291-012-0309-1](https://doi.org/10.1007/s10291-012-0309-1).
- Zhou F., Dong D., Li W., et al. GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. *GPS Solutions*. 2018. Vol. 22, 33. DOI: [10.1007/s10291-018-0699-9](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0699-9).
- Zumberge J. F., Heflin M.B., Jefferson D.C. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1997. Vol. 102, no. B3. P. 5005–5017. DOI: [10.1029/96JB03860](https://doi.org/10.1029/96JB03860).
URL: <https://qzss.go.jp/en/technical/download/pdf/ps-is-qzss/is-qzss-l6-001.pdf> (дата обращения 1 февраля 2021 г.).
URL: https://www.isro.gov.in/sites/default/files/irnss_sps_1cd_version1.1-2017.pdf (дата обращения 1 февраля 2021 г.).
URL: <https://www.sonel.org> (дата обращения 1 февраля 2021 г.).
URL: <https://hive.geosystems.aero> (дата обращения 1 февраля 2021 г.).
URL: <https://eft-cors.ru> (дата обращения 1 февраля 2021 г.).
URL: <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201096516-IGS-Formats> (дата обращения 1 февраля 2021 г.).
URL: <http://gps.ece.cornell.edu/briefs.php> (дата обращения 25 марта 2021 г.).
URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-1-second> (дата обращения 25 марта 2021 г.).

URL: <https://gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200J.pdf> (дата обращения 1 февраля 2021 г.).

URL: <https://www.nstb.tc.faa.gov/DisplayArchive.htm> (дата обращения 1 февраля 2021 г.).

URL: ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/swpc_products/daily_reports/solar_event_reports (дата обращения 1 февраля 2021 г.).

URL: <https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 25 марта 2021 г.).

URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/radio-bursts/reports/fixed-frequency-listings> (дата обращения 1 февраля 2021 г.).

Как цитировать эту статью:

Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 2. С. 30–52. DOI: [10.12737/szf-72202104](https://doi.org/10.12737/szf-72202104).