

Определение уровня диагностических сбоев полной электронной концентрации по данным GPS-наблюдений в различных широтных регионах

В. И. Захаров^{1,a}, Ю. В. Ясюкевич^{2,b}, Н. С. Носикова^{3,c}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

²Институт солнечно-земной физики СО РАН. Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 126-а. А/я 291.

³Институт физики Земли РАН. Россия, 123242, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1.
E-mail: ^azvi_555@list.ru, ^byasukevich@iszf.irk.ru, ^cnatanosik@yandex.ru

Статья поступила 20.11.2016, подписана в печать 17.01.2017.

В работе приведены результаты статистического анализа распределений скорости изменения полного электронного содержания (ПЭС) для различных наборов из около 400 станций сети IGS, расположенных в высоких (около 200 станций), средних (свыше 100) и экваториальных широтах (свыше 100 станций) соответственно. Рассмотрение проведено для 2010 и 2014 гг. в различных гео- и гелиофизических условиях, фазах минимума и практического максимума 24-го солнечного цикла. Целью анализа является экспериментальное нахождение порогового значения величины скачков ПЭС, связанного с «хвостами» исследуемых распределений при заданном физически адекватном уровне значимости. Получено, что величина порога, с которого измеряемые величины могут считаться статистическим шумом, зависит от широты региона наблюдения. Максимальным порог является для арктического региона, а минимальным — для экваториальной группы станций.

Ключевые слова: навигационная система, псевдодальность, фаза, сбой, ионосфера, полное электронное содержание ПЭС, магнитная буря, суббуря, геомагнитный индекс, статистика, вероятность, статистический уровень.

УДК: 551.51, 551.55, 551.59, 550.338.2, 551.515. PACS: 94.20.-y, 94.20.Vv, 94.20.wg, 94.20.wj, 94.20.wh, 94.80.+g.

Введение

Развитие навигационных технологий привело к активному использованию высокостабильных сигналов для целей дистанционного мониторинга околоземного космического пространства и процессов, протекающих в нем. Для определения диагностического параметра — полного электронного содержания (ПЭС) — и его вариаций используются прецизионные измерения фазы принимаемых сигналов.

Общепризнанным является влияние космической погоды на магнитосферу и ионосферу Земли, когда при изменении гео- и гелиофизических условий происходит усиление процессов поглощения и рассеяния радиоволн. В определенных случаях это ведет к невозможности измерить радионавигационные параметры сигнала конкретного спутника или определить указанный выше диагностический параметр.

В этой связи нуждается в уточнении границ своей применимости подход, по которому величина скачков и сбоев диагностического параметра ПЭС и ее производной характеризуются величиной гипотетических «нефизических» сбоев. Под последним понимается определение порога для классификации сбоев скорости изменения ПЭС в виде одного порогового значения, выше которого изучаемый параметр «просто не может быть» для всех регионов

ионосферы. На наш взгляд, отмеченная выше произвольность выбора порога в исследованиях сбоев диагностического параметра ПЭС нуждается в обязательном обосновании, например, со статистических позиций.

1. Краткий обзор проблемы

В литературе широко обсуждаются вопросы как инструментальных (т.е. аппаратных), так и рассматриваемых нами диагностических сбоев работы навигационной системы GPS. В различных статьях последнего десятилетия [1–11] рассматриваются разные аспекты проявления этих сбоев при работе навигационных систем в возмущенных условиях.

При анализе инструментальных сбоев критерием их появления является отсутствие принимаемого сигнала или невозможность его текущего определения. В то же время случай диагностического сбоя ПЭС менее очевиден. Устанавливаемые в этой ситуации уровни во многом «произвольны» и основаны на понятии «нефизичности скорости изменения». Так, принято считать сбоями ситуации, когда ПЭС возрастает со скоростью более нескольких ТЕСи/мин, что превосходит скорости изменения этого параметра для большинства равновесных явлений в ионосфере Земли. Однако превышение этих уровней может соответствовать откликам ионо-

сферы на достаточно редкие мощные магнитные возмущения, УФ- или рентгеновские вспышки на Солнце или даже радиоизлучение от Солнца [3]. Так, в работе [13] показано, что УФ-вспышки могут давать отклики в ионосфере с большими скоростями роста ПЭС [14]. Более того, рассматриваемые скорости изменения могут соответствовать также влиянию флуктуаций ионосферной плазмы, которые и исследуются по вариациям ПЭС.

В наиболее полной по охвату проблемы на настоящее время работе [11] использован именно такой «дуалистический» подход. Авторами рассмотрено влияние сильных магнитных бурь и суббурь в Арктическом регионе в период 2010–2014 гг. на вероятности сбоев системы GPS при непрерывном наблюдении в течение более 1820 дней (!) на порядка 200 станциях арктического региона. На основе этой беспрецедентной статистики наблюдений изучены вероятности «инструментальной» потери фазы и псевдодальности, а также кратковременных физически маловероятных вариаций скорости регистрируемого полного электронного содержания. Установлено, что в высоких широтах вероятности сбоев при определении ПЭС значительно (в 100–200 раз) больше, чем чисто инструментальные, и они растут во время гео- и гелиомагнитных возмущений различной природы. Еще раз напомним, что в этой работе использовался подход, связанный с произвольным выбором уровня по признаку «нефизичности» наблюдаемой скорости изменения ПЭС.

Между тем скачки ПЭС и уровни их определения могут быть связаны с региональными особенностями ионосферы [8, 13, 15] в различных гео- и гелиофизических условиях. Таким образом, для корректного изучения величины уровня сбоев нужно провести анализ ионосферных шумов на больших временных интервалах в различных условиях. В нашей работе проводится именно такой анализ статистически редких событий, связанных с «хвостом» распределений, что позволяет определить величину уровня скачков ПЭС при заданном уровне значимости. При этом непрерывный мониторинг происходит для 3 широтных областей, что дает возможность исследовать широтную зависимость изучаемого параметра для двух фаз солнечного цикла — фазах роста и максимума солнечной активности.

2. Методика статистического определения величины уровня скачков ПЭС

Для определения отклика ионосферы на различные геофизические события обычно используется метод измерения полного электронного содержания I ПЭС на основе двухчастотных фазовых измерений сигнала GPS [16]. Анализ показывает, что процесс формирования сбоя изучаемого параметра I представляет собой результат суммы собственно сбоев, определяемых инструментальными особенностями регистрации фаз $L1$ и $L2$ и изучаемыми

процессами в среде. В большом числе приложений вместо самого значения I используется его производная по времени dI/dt . В дальнейшем изложении мы везде используем именно производную ПЭС по времени, оставив за ней для краткости обозначение I , но сохранив размерность ТЕСи/мин. Мы надеемся, что это не вызовет трудностей у читателя.

Суть предлагаемой нами процедуры сводится к следующему. В выбранном большом широтно-долготном регионе строится распределение изучаемого параметра для большого интервала времени. Базовыми статистиками [17] могут служить распределения параметра I в выбранном регионе, например, за 1 день. Затем проверяется гипотеза о принадлежности полученного распределения к нормальному закону. В случае «нормальности» определяется величина уровня значимости, для которой удельный вес «хвоста» распределения меньше заданного уровня, т.е. определяет уровень сбоя в статистическом смысле. Аналогичные действия могут быть проделаны для средних по месяцам распределений в течение нескольких лет, соответствующих различным уровням солнечной активности. Более подробно методическая часть работы изложена в [12].

В заключение методической части заметим, что величина наблюдаемого значения ПЭС и скорости его изменения зависят от угла возвышения навигационного ИСЗ. Так, в [11, 13–15] отмечается значительная зависимость от указанного параметра. Поэтому в дальнейшем рассмотрении этот факт также необходимо учитывать.

3. Анализируемые данные

Мы рассмотрели три региона, соответствующие высоким, средним и экваториальным широтам. В виде первичных мы использовали данные наблюдений фаз сигналов обеих рабочих частот $L1$, $L2$, проведенных на выбранных станциях сети IGS [18] и представленных в формате RINEX. Годы наблюдений относятся к разным уровням солнечной активности. Так, на 2010 г. приходится начало нетипичного 24-го солнечного цикла, а на 2014-й — его условный максимум [19]. Для всех станций сети IGS, попавших в каждый регион, проводилось непрерывное изучение вариаций скорости изменения ПЭС, отнесенных на местную вертикаль, по каждому наблюдаемому на станции навигационному ИСЗ в период 2010 и 2014 гг.

Расположение всех станций, участвовавших в анализе, общим числом свыше 400, приведено на карте рис. 1. Группы станций отличаются различным географическим расположением. Группа I состоит из 180 станций, расположенных севернее 55°N (см. область I на рис. 1). При анализе среднеширотных данных мы использовали выборку из 120 станций, лежащих в географическом «квадрате» на территории США с вершинами углов (30°N , 125°W) и (50°N , $\sim 110^\circ \text{W}$) соответственно. На карте она

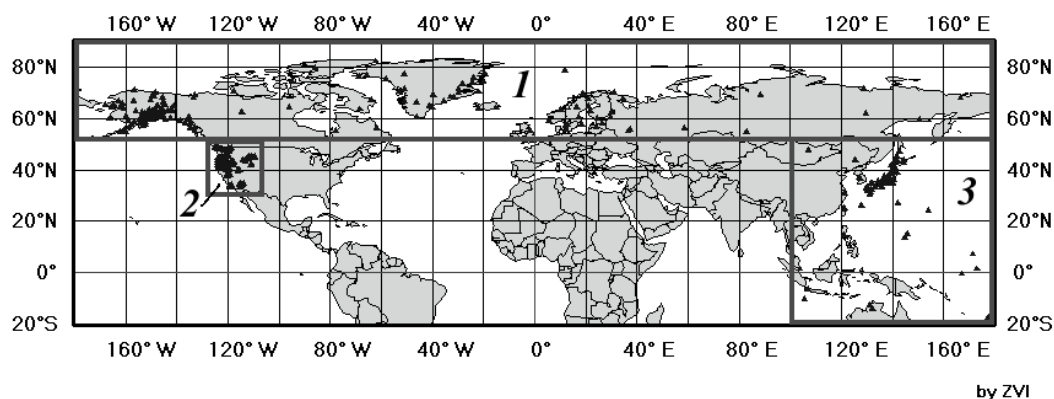


Рис. 1. Расположение групп станций, использованных в работе: 1 — группа высокоширотных станций «Север», 2 — среднеширотная группа станций «Центр», 3 — группа «Юг». Положения станций отмечены треугольниками

обозначена цифрой 2. В качестве экваториальной сети (3) мы взяли область от (50° N, 30° E) (30° S, 180° E), из которой выбрали не менее 100 станций сети IGS, преимущественно расположенных в Юго-Восточной Азии и Японии. Далее в работе для краткости группа 1 названа группой станций «Север», группа среднеширотных станций получила название «Центр», а группа станций Юго-Восточной Азии и Японии — «Юг».

Ежедневный полученный объем данных составляет более 0.6 млн отсчетов для каждой из групп. Полная статистика в каждом году составляет не менее 1.6 млн ч наблюдений для северной группы станций, более 940 тыс. ч для станций, расположенных в средних широтах и свыше 760 тыс. ч — для экваториальных станций. Итак, все приведенные далее в работе оценки статистически значимы и получены с достаточной для практики точностью.

В работе приведено рассмотрение влияния скачков и диагностических сбоях для трех значений угла визирования — 10, 15 и 20° соответственно. Для определения периодов гео- и гелиомагнитной активности нами использовались индексы геомагнитной активности Kp, Dst и для высоких широт AE [20].

4. Основные полученные результаты

Для интегральной характеристики региона рассмотрим зависимости от времени средней за 1 ч (а также 1 мес) величины $I = dTEC/dt$. Эта величина в нашей постановке задачи является индикатором усредненной реакции всего региона на гео- и гелиофизические условия.

Проведенный нами анализ показывает, что распределение P величины I с высокой степенью точности (не хуже 98.9%) можно считать в среднем подчиняющимся нормальному закону. Таким образом, для оценки параметров распределения в нашей задаче можно пользоваться предельными величинами. Общеизвестно, что при нормальном законе распределения удельный вес «хвостов распределения» на уровне значимости 1σ имеет величину в 31.7%,

для 2σ — не более 4.56% случаев. Под «хвостом распределения» понимается относительная доля случаев, превышающих установленный порог — например, 2σ или 3σ .

Далее в работе мы примем за разумный уровень величину в $2\sigma \sim 4.5\%$. Объем нашей статистики позволяет принимать и другие, более прецизионные значения, однако в этом случае существует определенная сложность получения устойчивых оценок пороговых значений величин «хвостов» за одни сутки.

На рис. 2 представлена временная зависимость усредненной за день вероятности P появлений значений скачков, превышающих уровень 2σ , экспериментально наблюдаемых для группы станций «Север», в 2010 и 2014 г. соответственно. Отдельные наблюдаемые в течение 2010 и 2014 гг. всплески могут быть связаны с конкретными гелио- и геофизическими явлениями. Например, 27.02.2014 отмечался локальный всплеск индекса AE до 1170 нТ, аналогичное событие имело место и для второго пика (10.11.2014). Вместе с тем другие, не менее значительные всплески индекса AE, не имеют таких видимых проявлений и величины функций взаимной корреляции «хвостов» распределений и поведения индекса AE в течение месяца не превышают 0.3 для обоих рассмотренных лет, что может служить подтверждением случайного характера анализируемых выбросов и адекватности использования предложенной методики. Иными словами, мы исследуем шум и собственно сбой параметра, а не его возможные информационные изменения.

Отметим также, что средняя за год величина изучаемого параметра больше для 2014 г. Это может быть связано с тем, что 2010 г. был началом 24-го солнечного цикла, который характеризуется уменьшением почти вдвое солнечной активности по сравнению с предыдущим 23-м циклом.

Анализ полученных данных, подобных представленным на рис. 2, показывает, что наибольшая вариабельность присуща группе станций «Север», т.е. соответствует именно Арктическому региону.

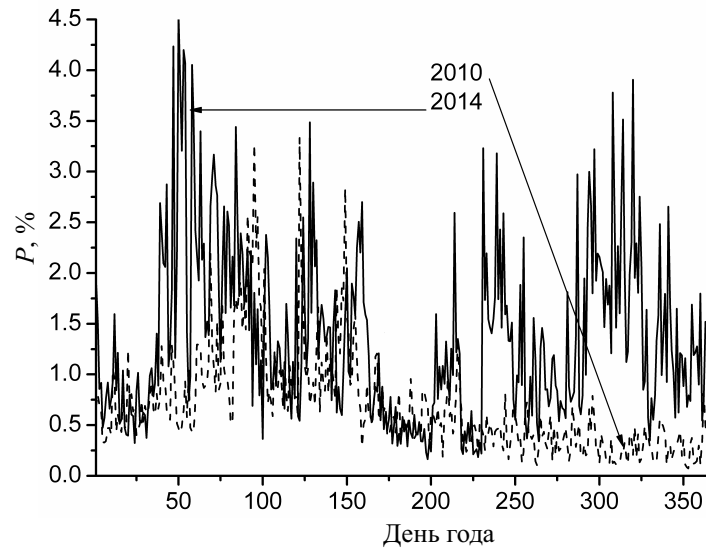


Рис. 2. Временная зависимость вероятности P появления значений скачков I , превышающих уровень 2σ и экспериментально наблюдаемых для группы станций «Север», усредненное по дням наблюдений в 2010 и 2014 г. соответственно

Забегая вперед, отметим, что средний уровень мощности шумов максимален именно для Арктического региона, уменьшается в средних широтах и несколько растет в экваториальных.

Перейдем к оценке численной величины уровня срыва для выбранного уровня значимости с использованием функций распределения по методике п. 3.

На рис. 3 приведены функции распределения P , т.е. скорости изменения ТЕС во времени, в диапазоне периодов более 5 мин для трех рассмотренных регионов за два года. Для удобства рассмотрения область $[-1 \text{ ТЕСу/мин}, 1 \text{ ТЕСу/мин}]$ на графиках не представлена.

Области распределений P изучаемого параметра для величины, лежащей в интервале $[-\infty, -6 \text{ ТЕСу/мин}]$ и $[6 \text{ ТЕСу/мин}, \infty]$, отнесены к одной соответствующей ячейке -6 ТЕСу/мин и 6 ТЕСу/мин ; они и являются исследуемыми «хвостами» распределений. Напомним, что рассматриваемые в нашей работе годовые объемы статистик наблюдений достигают величин более 10^9 отсчетов фазы. При одинаковых внешних гео- и гелиомагнитных условиях можно ожидать равенство законов распределения (в пределах статистических погрешностей). Однако такого не происходит: данные отражают широтное влияние ионосферы на процесс измерений.

Сравнительный анализ полученных данных для одного года показывает, что распределения для арктического региона и Юго-Восточной Азии имеют более широкий вид по сравнению с данными для средних широт, что превышает статистическую погрешность. Величины «хвостов» также больше для группы станций «Север» и «Юг» соответственно в порядке убывания своей величины. Так, сравнивая результаты 2010 г. (рис. 3, а) и 2014 г. (рис. 3, б),

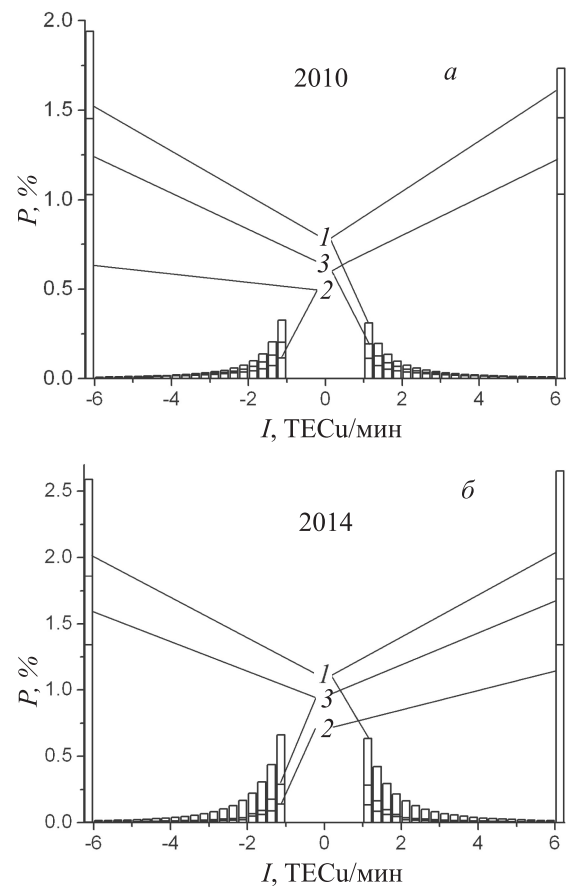


Рис. 3. Распределение P скорости изменения di/dt по времени для двух лет — 2010 и 2014 гг. и 3 регионов: кривая 1 — для региона «Север», 2 — зависимость для региона «Центр» и 3 — «Юг». Центральное тело распределения для удобства не показано

получаем, что абсолютные значения «хвостов» увеличиваются более чем на 15–25%. Анализ показывает, что отдельные реализации за 1 день могут иметь интенсивность вплоть до вдвое большей. Указанные различия являются следствием широтного

положения наблюдательных станций и отражают влияние гелиомагнитных условий на процесс измерений.

Полученные данные позволяют выявить динамику изменений изучаемого параметра и показывают соотношения в его величине для разных регионов. Полученная нами широтная динамика величины «хвоста» распределения следующая. В 2010 г. (см. рис. 3, *a*), минимальные величины «хвоста» наблюдались для области «Центр», обозначенной цифрой 2 на рис. 1, затем следовала группа станций «Юг», для которой величина относительного веса «хвоста» увеличивается. И наконец, самая большая изменчивость имела место в высоких широтах — группа станций «Север» и область 1. Общий вклад «хвостов» каждого из распределений составил менее 3.5%.

В 2014 г ситуация изменилась. Даже для усредненных величин довольно значительно возросли вариации больших значений в распределении, как это видно на рис. 3, *б*. Так, доля вариаций по абсолютному значению более 1 ТЕСу/мин возросла почти вдвое. Это является следствием проявления гео- и гелиомагнитной активности, т.е. скорее информационно-значимым событием, а не сбоем в статистическом смысле этого слова. В это время доля «хвостов» увеличилась почти на 30% и составила в целом по распределениям от 3 до 5% от полного значения соответственно для станций групп «Центр» и «Север». Видно, что предложенный уровень 2σ представляет собой оптимальную величину для исследований собственно сбоев или редких очень больших скачков изучаемого параметра.

На рис. 4, *a* и *б* приведены зависимости средних за месяц абсолютных величин «хвостов» распределений для двух лет — 2010 и 2014 гг. и трех групп станций. Видна общая тенденция: величина вариаций ПЭС (по сути — дисперсия распределения) имеет минимальное значение в средних широтах, этот уровень растет в экваториальном регионе и достигает своего максимума в приполярных широтах. Обращает на себя внимание тот факт, что в 2014 г. на фазе роста солнечной активности величина «хвостов» распределения и дисперсия распределений растет, иными словами, распределения становятся шире. На рис. 4 представлена динамика событий — рост величины «хвостов» от двух- до четырехкратного в зависимости от времени года и региона. Это обстоятельство приводит в целом к определению оптимального коридора пороговых величин скачков. Указанный коридор, впервые определенный в нашей работе для 24-го солнечного цикла, нуждается в дополнительных исследованиях с привлечением статистики других солнечных циклов.

Суммарные результаты проведенного анализа полученных нами данных для усредненных значений I величины скорости изменения ПЭС во времени для периодов 1 день и 1 месяц представлены в таблице.

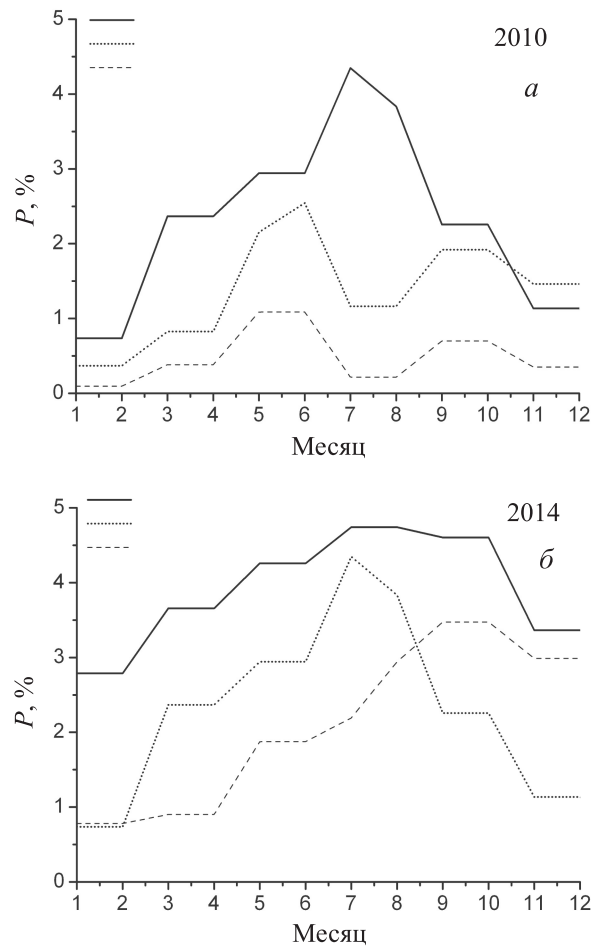


Рис. 4. Абсолютная величина «хвостов» распределений параметра $P(I) = dTEC/dt$, усредненная помесячно. Панель *a* — в 2010 г. и *б* — в 2014 г. Жирная кривая соответствует группе станций «Север», пунктир — группе станций «Центр», точечная кривая — группе станций «Юг»

Так, уровень оказывается максимальным для фазы максимума солнечной активности — для группы арктических станций. В этом случае уровень сбоя может быть выбран как превышение скачка dI/dt более чем 5–6 ТЕСу/мин, для средних широт он составляет более 2–2.5 ТЕСу/мин и для экваториальных широт его значение оценивается не менее 3 ТЕСу/мин.

Величины скачков, которые можно считать порогом для определения статистического сбоя.

Величины уровней зависят от широты станций наблюдения и солнечной активности (2010 — год начала 24-го солнечного цикла, 2014 — фаза роста или условного максимума)

Регион	Временной период, годы	
	2010	2014
«Север»	> 5 ТЕСу/мин	> 5–6 ТЕСу/мин
«Центр», Калифорния	> 1–1.5 ТЕСу/мин	> 2–2.5 ТЕСу/мин
«Юг»	> 2 ТЕСу/мин	> 3 ТЕСу/мин

Наши выводы об особенностях поведения изучаемого параметра в различных широтных регионах в целом подтверждаются исследованиями распределений дисперсии, т. е. прямыми оценками мощности скорости изменения ПЭС.

В заключение обсуждения оценок «диагностических» сбоев необходимо отметить следующее. Для решения навигационной задачи современные системы типа GPS–GLONASS используют одновременно принимаемые сигналы от разного числа навигационных ИСЗ. Их количество доходит до 8–11 даже при навигации в высоких широтах. Это означает, что в среднем значительного влияния на позиционирование рассматриваемые в статье сбои не оказывают, хотя они и могут приводить к ухудшению и снижению точности местоопределения или даже его кратковременному срыву. Рассматриваемые сбои не случайно названы нами «диагностическими», поскольку имеют важное значение именно для решения различных геофизических задач диагностики параметров сред.

Приведенные результаты относятся к случаю маски на угол визирования 10° . Мы также провели рассмотрение, аналогичное изложенному выше и для других углов возвышения 10, 15 и 20° . К сожалению, ограниченный объем статьи не позволяет обсудить эти результаты подробно. Тенденция изменения результатов в этих случаях прослеживается достаточно уверенно. Величина порога для определения величины сбоя при росте угла визирования меняется не более чем на 0.5 ТЕСу/мин, что составляет менее 20% в относительном выражении. Рост угла визирования в диапазоне рассмотренных углов 10 – 20° приводит к почти пропорциональному уменьшению числа статистических сбоев скорости ПЭС, а не к такому резкому, как это отмечается при произвольном выборе величины уровня сбоев [11, 13, 15].

По своему построению предложенная нами процедура определения «диагностических» сбоев позволяет получить для заданного доверительного интервала именно уровень статистического шума, который может считаться сбоем. Поэтому наша методика оказывается более предсказуемой к изменению внешних условий

Выводы

В работе проведен экспериментальный анализ статистики величин скачков ПЭС, наблюдаемых в арктическом, среднеширотном и экваториальном регионах для сетей из 100–200 станций каждая. Нами использованы наблюдения в течение 2010 и 2014 гг., всего примерно на 400 станциях, что составило более 1.6 млн ч наблюдений для северной группы станций, более 940 тыс. ч для станций, расположенных в средних широтах, и свыше 760 тыс. ч — для экваториальных станций.

Показано, что с высокой степенью вероятности распределения скорости изменения ТЕС по времени являются нормальными. В качестве оптимальной величины статистического параметра для дальнейшего оценивания обоснован выбор уровня, соответствующего интервалу 2σ . Проведены экспериментальные оценки частот появления скачков, превышающих выбранный уровень для различных временных разбиений (час, сутки, месяц, год). Получено, что для различных широтных зон существует свой уровень флуктуаций, который варьируется в течение года и превышает выбранный уровень значимости в 2σ . Так, уровень оказывается максимальным для фазы максимума солнечной активности. Для арктического региона в этот период величина уровня сбоя может быть выбрана как превышение $d\text{ТЕС}/dt$ значения 5–6 ТЕСу/мин, для средних широт он составляет более 2–2.5 ТЕСу/мин и для экваториальных широт его значение оценивается не менее 3 ТЕСу/мин. Для периода начала 24 солнечного цикла (2010) соответствующие значения порогов округленно составляют величины более 5, 1–1.5 и 2 ТЕСу/мин соответственно.

Полученные нами результаты позволяют определить численную величину порога, с которого измеряемые величины могут считаться статистическим сбоем. Отметим, что эта величина зависит от широты региона наблюдения, т. е. от региональных свойств ионосферы. Рост угла визирования в диапазоне углов 10 – 20° приводит к обратно пропорциональному величине угла уменьшению числа статистических сбоев в определении скорости изменения ПЭС. Предложенный подход позволяет определять уровень сбоя более корректно, поскольку не относит именно к сбоям определяемую с использованием навигационных сигналов GPS/GLONASS и изучаемую разными методами собственно реакцию ионосферы на различные гео-, гелиофизические условия.

Работа по анализу архивных данных выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 16-05-01024). Часть работ, связанная с анализом высокоширотных данных, выполнена при поддержке РФФИ (грант 15-05-01814).

Список литературы

1. *Demyanov V.V., Yasyukevich Yu.V.* // *GPS Solutions*. 2012. **16**, N 2. P. 181.
2. *Mannucci P.X., Lindqwister A.J., Ho U.J.* // *Geophys. Res. Lett.* 1997. **2**, N 18. P. 2283.
3. *Афраймович Э.Л., Гаврилюк Н.С., Демьянов В.В.* и др. // *Космич. исслед.* 2009. **47**, N2. С. 146. (*Afraimovich E.L., Demyanov V.V., Gavriljuk N.S.* et al. // *Cosmic Research*, 2009. **47**, N 2. P. 126.)
4. *Jakowski N., Stankov S.M., Klaehn D.* // *Ann. Geophys.* 2005. **23**. P. 3071.
5. *Basu Su., Basu S., Makela J.J., MacKenzie E.* et al. // *J. Geophys. Res.* 2008. **113**. A00A06.
6. *Rama Rao P.V.S., Gopi K.S., Vara P.J.* et al. // *Ann. Geophys.* 2009. **27**. P. 2101.

7. Bergeot N., Bruyninx C., Defraigne P., Pireaux S. et al. // *GPS Solut.* 2011. **15**. P. 171.
8. Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev I. // *Space Weather.* 2014. **12**, N 7. P. 508.
9. Mushini S.C., Jayachandran P. T., Langley R.B., Pokhotelov D. // *GPS Solut.* 2012. **16**. P. 363.
10. Meggs R.W., Mitchell C.M., Honary F. // *GPS Solut.* 2008. **12**. P. 281.
11. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. // Космич. исслед. 2016. **54**, № 1. С. 1. (Zakharov V.I., Yasyukevich Yu.V., Titova M.A. // *Cosmic Research.* 2016. **54**, N 1. P. 20.)
12. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Пронин В.Е. // УЗФФ. 2017. **1**. 171901. (Zakharov V.I., Yasyukevich Y.V., Pronin V.E. // *Sci. Lett. Mos. Univ.* 2017. **1**. 171901.)
13. Ясюкевич Ю.В., Воейков С.В., Живетьев И.В., Косоговор Е.А. // Космич. исслед. 2013. **51**, № 2. С. 125. (Yasyukevich Y.V., Voeykov S.V., Zhivetiev I.V., Kosogorov E.A. // *Cosmic Research.* 2013. **51**, N 2. P. 114.)
14. Куницын В.Е., Назаренко М.О., Нестеров И.А., Падохин А.М. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2015. № 4. С. 95. (Kunitsyn V.E., Nazarenko M.O., Nesterov I.A., Padokhin A.M. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2015. **70**. P. 312.)
15. Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Zakharov V.I., Engebretson M.J. // *GPS Solutions.* 2016.
16. Hoffman-Wellenhoft B. *GPS Theory and Practice.* New York: Springer-Verlag Vienna, 1998.
17. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. (Bendat J.S., Piersol A.C. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures.* New York: Wiley, 1971.)
18. http://www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR_2012_Ischkov.pdf
19. <http://www.sopac.ucsd.edu>
20. <http://wdc.kugi.kuoto-u.ac.jp/dstae/index.html>

Determination of the level of diagnostic slips of the total electron content from GPS observations in different latitudinal regions

V. I. Zakharov^{1,a}, Y. V. Yasyukevich^{2,b}, N. S. Nosikova³

¹Department of Physics of Atmosphere, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

²Institute of Solar-Terrestrial Physics, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. P/o box 291, Irkutsk 664033, Russia.

³Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow 123242, Russia
E-mail: ^azvi_555@list.ru, ^byasyukevich@iszf.irk.ru, ^cnatanosik@yandex.ru.

This paper presents the results of the statistical analysis of the total electron content (TEC) variation rate distributions for different sets of approximately 400 IGS network stations located at high (~ 200 stations), middle (> 100 stations), and equatorial latitudes (> 100 stations). The analysis is carried out for 2010 and 2014 under different geo- and heliophysical conditions, as well as phases of the minimum and practical maximum of the 24th solar cycle. The aim of the analysis is the experimental determination of the threshold value of the magnitude of sudden TEC changes associated with the tails of the investigated distributions for a given physically adequate level of significance. It is found that the threshold value from which the measured values can be considered statistical noise depends on the latitude of the observation region. The maximum threshold occurs for the Arctic region and the minimum occurs for the equatorial group of stations.

Keywords: navigation system, pseudorange, phase, slip, ionosphere, total electron content (TEC), magnetic storm, substorm, geomagnetic index, statistics, probability, statistical level.

PACS: 94.20.-y, 94.20.Vv, 94.20.wg, 94.20.wj, 94.20.wh, 94.80.+g.

Received 20 November 2016.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2017. **72**, No. 6. Pp. 620–626.

Сведения об авторах

1. Захаров Виктор Иванович — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: zvi_555@list.ru.

2. Ясюкевич Юрий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: yasyukevich@iszf.irk.ru.

3. Носикова Наталия Сергеевна — инженер; e-mail: natanosik@yandex.ru.