

Метод статистического определения уровня сбоев полной электронной концентрации по данным GPS наблюдений

В. И. Захаров^{1,2,*}, Ю. В. Ясюкевич^{2,†}, В. Е. Пронин^{1‡}

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, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126-а, а/я 291

(Статья поступила 08.01.2017; Подписана в печать 31.01.2017)

Предлагается метод определения уровня, превышение которого можно считать сбоем при определении скорости изменения во времени полной электронной концентрации. Метод основан на статистической оценке свойств распределения изучаемого параметра. Задачей методики является экспериментальное нахождение порогового значения величины скачков полного электронного содержания, связанного с «хвостами» исследуемых распределений при заданном физически адекватном уровне значимости, определяемом широтными свойствами и гео-гелиофизическими условиями. 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 среднеширотной группы станций. Апробация метода проведена 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 солнечного цикла. В качестве уровня значимости выбран диапазон двух дисперсий.

PACS: 94.20.-y, 94.20.Vv, 94.20.wg, 94.20.wj, 94.20.wh, 94.80.+g.
550.338.2.

УДК: 551.51, 551.55, 551.59,

Ключевые слова: статистика, вероятность, статистический уровень, ионосфера, полное электронное содержание (ПЭС), фаза, сбой, магнитная буря, геомагнитные условия.

ВВЕДЕНИЕ

В геофизических приложениях часто рассматриваются функции распределения различных процессов. При этом особый интерес связан с редкими событиями, как правило, относящимся к «хвостам» экспериментально наблюдаемых распределений. Под «хвостом» здесь и далее понимается часть дифференциального распределения плотности вероятности, превышающая по абсолютному значению некую заданную величину.

Например, в практике дистанционного мониторинга околоземного космического пространства и процессов, протекающих в нем, последние десятилетия в качестве диагностической часто используется величина полного электронного содержания (ПЭС). Этот параметр получают в результате вычислений, использующих прецизионные измерения фаз принимаемых навигационных и зондирующих сигналов. Он определяется как интеграл от пространственного распределения электронной концентрации по лучу зондирования на исследовательский или навигационный ИСЗ в пересчете на местную вертикаль. Величина ПЭС и динамика изменения пара-

метра во времени оказались чувствительными ко многим гео- и геомагнитным явлениям и процессам естественного и техногенного происхождения в атмосфере, ионосфере и околоземном космическом пространстве [1–13].

Суть этого влияния связана с тем, что модуляция фазы сигнала несет определенную информацию о свойствах среды распространения сигнала. Вместе с тем, при изменении гео-гелиофизических условий происходит усиление рассеяния спутниковых радиосигналов на неоднородностях, что приводит к амплитудно-фазовым искажениям. В определенных случаях это ведет к невозможности измерить радионавигационные параметры (фазу и псевдозадержку на рабочих частотах) сигнала, принимаемого от конкретного спутника или определить для этого спутника величину ПЭС. Появляющиеся при этом сбои не случайно названы далее «диагностическими», поскольку имеют важное значение именно для решения различных геофизических задач диагностики параметров сред.

Так, известен подход, по которому величина скачков диагностического параметра ПЭС и его производной характеризуются величиной гипотетических «нефизических» сбоев. Под последним понимается определение критической скорости изменения ПЭС в виде одного порогового значения, выше которого изменения ПЭС «просто не могут быть». Эта величина задается одним значением для всех регионов. Иначе говоря, в качестве величины границ сбоя ПЭС принимается априорно за-

*E-mail: zvi_555@list.ru

†E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

‡E-mail: tolgamrab@yandex.ru

данный уровень, величина которого определяется в целом из произвольных, хоть и физических, соображений, единых для всей широтной зоны. Очевидно, что указанная произвольность выбора порога в исследованиях сбоев диагностического параметра ПЭС нуждается в пересмотре и обязательном обосновании. Цель данной работы — разработка и обоснования статистического критерия с позиции оптимального использования наблюдаемых сигналов, а именно — перестать приписывать явления сбоев редким событиям, на которые реагируют ионосферы Земли. Статья представляет собой методическое дополнение к нашей работе [21].

1. Обзор проблемы

Практически со времени начала эксплуатации навигационной системы GPS-GLONASS в литературе широко обсуждаются вопросы как инструментальных (аппаратурных), так и рассматриваемых нами в этой работе диагностических сбоев (сбоев в определении ПЭС).

В основных работах последнего десятилетия [1–11] рассматриваются разные аспекты проявления инструментальных и диагностических сбоев ПЭС и скачков скорости его изменения в возмущенных условиях. При этом можно отметить сложность анализа именно диагностических сбоев. При анализе инструментальных сбоев критерием их появления является отсутствие принимаемого сигнала или невозможность его текущего определения. Это выражается в пропуске записи исследуемого параметра — кода или фазы обеих рабочих частот или скачке фазы, связанном с особенностью работы фазометра. Случай диагностического сбоя или скачка скорости изменения ПЭС менее очевиден. Устанавливаемые в этом случае уровни для определения порога являются произвольными и основаны на понятии «нефизичности скорости изменения». Так, принято считать сбоями ситуации, когда ПЭС возрастает со скоростью более нескольких ТЕСу/мин, что превосходит скорости изменения ПЭС для большинства равновесных явлений в ионосфере Земли. Например, при восходе Солнца регулярные скорости возрастания ПЭС в ионосфере Земли составляют доли 1 ТЕСу/мин, что и задает группу обычно используемых уровней, кратных данной величине. Однако превышение этих уровней, в принципе, может соответствовать не сбою, но откликам ионосферы на достаточно редкие мощные магнитные возмущения, УФ или рентгеновские вспышки на Солнце или даже радиоизлучение от Солнца [3]. Например, в работе [12] показано, что УФ-вспышки могут давать отклики в ионосфере с аналогичными указанным скоростями роста [13]. Более того, рассматриваемые скорости изменения могут соответствовать также влиянию неоднородной, флуктуационной компоненты ионосферной плазмы, которая как раз и исследуется по вариациям ПЭС.

В работе [11] и ссылках к ней, наиболее полной по охвату проблемы на время написания данной ста-

тьи, рассмотрено влияние, которое оказывают сильные магнитные бури и суббури в Арктическом регионе в период 2010–2014 гг. на вероятности сбоев параметров навигационных сигналов системы GPS. Авторами проведен практически непрерывный пятилетний анализ динамики появления сбоев в зависимости от гео- и гелио-магнитных условий для около 200 станций сетей IGS и канадской сети CHAIN, расположенных в Арктическом регионе. На основе не имеющей в данное время аналогов статистики наблюдений 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-гелиомагнитных возмущений различной природы. Основной причиной роста инструментальных сбоев, по утверждениям авторов [11], является рост поглощения, который происходит во время геомагнитных бурь. Однако и в этой работе использовался подход, связанный с произвольным выбором уровня по признаку «нефизичности» наблюдаемой скорости изменения ПЭС.

Разнообразные исследования показывают, что скорость изменения различных процессов в ионосфере или даже срыв измерения радионавигационных параметров может служить индикатором состояния ионосферы. Так, в работе [8] показано, что во время 4 супер-бурь возрастание плотности сбоев ПЭС в возмущенных условиях может превышать в 50 раз аналогичную величину в невозмущенных условиях. Объявляя срывом естественную скорость изменения в данных широтных гео-гелиофизических условиях возможно сужение диапазона вариаций изучаемого параметра.

Важность настоящих исследований определяется и тем, что скачки и сбои ПЭС, да и сами численные величины критериев уровней для определения сбоев могут быть связаны, в принципе, с региональными особенностями наблюдаемой ионосферы [8, 12, 14] и зависят от различных геомагнитных условий. Таким образом, для более корректного определения величины уровня сбоев или скачков необходимо принять во внимание региональные особенности ионосферы и провести анализ уровня ионосферных шумов на больших временных интервалах и в различных гео-гелиофизических условиях. В исследованиях нужно учесть фазовые инструментальные сбои и статистически определить уровень сбоев измерений ПЭС при заданном уровне значимости. В нашей работе именно с таких позиций рассматривается методика статистического анализа именно редких событий, связанных с «хвостами» распределений. При экспериментальном использовании предлагаемой методики нужно исследовать эмпирический закон распределения наблюдаемого параметра и затем проводить синхронный непрерывный мониторинг для нескольких широтных областей. Это позволит выявить, в случае ее существования, широтную зависимость изучаемого параметра для нескольких фаз солнечного цикла — например, фазах роста и максимума солнечной активности.

2. Методика статистического определения величины уровня скачков ПЭС

Для изучения отклика ионосферы на различные геофизические события обычно используется метод измерения ПЭС I на основе двухчастотных фазовых измерений сигнала GPS [15]:

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + K + mL], \quad (1)$$

где f_1 , f_2 — рабочие частоты спутниковой системы GPS, соответственно 1575.42 и 1227.6 МГц; $L_1 \lambda_1$, $L_2 \lambda_2$ — дополнительные пути радиосигналов, обусловленные фазовым запаздыванием в ионосфере, м; L_1 , L_2 — число оборотов фазы на рабочих частотах GPS; λ_1 , λ_2 — длины волн, м; K — постоянная величина, обусловленная неоднозначностью определения фазы, mL — неопределенность измерения фазового пути.

Анализ приведенного выражения показывает, что процесс формирования сбоев изучаемого параметра I представляет собой результат суммы собственно сбоев, определяемых инструментальными особенностями регистрации фаз L_1 и L_2 и изучаемыми процессами в среде. В большом числе приложений вместо самого значения ПЭС 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 ТЕСу/мин. Мы надеемся, что это не вызовет трудностей у читателя.

Очевидно, что минимальное значение сбоев изучаемого параметра определяется статистикой инструментальных сбоев по обоим рабочим фазам принимаемых сигналов в отсутствии собственных скачков фаз ($m = 0$ в (1)) в случае отсутствия возмущений в среде. Рассматриваемые нами сбои ПЭС могут приводить к кратковременным всплескам скорости изменения изучаемого параметра. Примечательно, что скачки при определении фаз могут быть «синхронными», т. е. не приводить к появлению собственно сбоя. Если принять, что скачки фаз обеих рабочих частот и их производные по времени статистически независимы, то для оценки величины $P(I)$ вероятности сбоев ПЭС получаем соотношение

$$P(I) \geq P(L_1) + P(L_2), \quad (2)$$

где $P(L_1)$, $P(L_2)$ — вероятности сбоев соответствующей фазы принимаемого сигнала (или ее скорости изменения). Для краткости обозначим эти вероятности как α_1 и α_2 . Поскольку одна из этих вероятностей, как показывают исследования [11], больше чем другая, то для упрощения оценок можно использовать параметр $\alpha_0 = \max(\alpha_1, \alpha_2)$ и получить вместо (2) упрощенное соотношение

$$P(I) \geq 2\alpha_0. \quad (3)$$

Таким образом, из (3) можно определить величину порога, для которого вероятности зафиксировать заданные абсолютные значения скорости I_0 изменения ПЭС будут превышать уровень значимости α_0 , задаваемый по экспериментальным распределениям $P(I)$ изучаемого параметра по следующему интегральному соотношению

$$\int_{-I_0}^{I_0} P(I) dI > 1 - 2\alpha_0, \quad (4)$$

где пределы интегрирования взяты симметричными для простоты. Из полученного уравнения (4) можно определить параметр I_0 , т. е. уровень, превышение которого может считаться значительным скачком или сбоем в статистическом смысле.

Итак, в выбранном достаточно большом широтно-долготном регионе строится распределение изучаемого параметра (скорости изменения ПЭС) для большого интервала времени. Базовыми статистиками [16] для исследований 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 уровень значимости, для которого и оценивается величина исследуемого параметра, т. е. при которой удельный вес «хвоста» распределения меньше заданного уровня значимости, т. е. является сбоем в статистическом смысле. Аналогичные действия могут быть проделаны для средних по месяцам распределений в течение для нескольких лет, соответствующих различным уровням солнечной активности. Строго говоря, в каждом эксперименте получаются значения уровня для двух частей распределения, соответствующих положительной и отрицательной скорости его изменения, из которых можно определить максимальное абсолютное значение параметра — собственно величину I_0 .

Величина наблюдаемого значения ПЭС и скорости его изменения зависят от угла возвышения навигационного ИСЗ. Так, в [11–14] отмечается значительная зависимость от указанного параметра. Поэтому при экспериментальных исследованиях этот факт также необходимо учитывать.

3. Анализируемые данные

Мы рассмотрели три региона, соответствующие высоким, средним и экваториальным широтам. В виде первичных использованы данные наблюдений фаз сигналов обеих рабочих частот L_1 , L_2 , проведенных на выбранных станциях сети IGS [17] 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 г. — его условный максимум [18]. Для всех станций сети IGS, попавших в каждый регион, проводилось непрерывное изучение вариаций скорости

изменения ПЭС, отнесенные 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 1 состоит из 180 станций, расположенных севернее 55°N — см. область 1 на рис. 1. При анализе среднеширотных данных использована выборка 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. Она на карте 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 миллиона отсчетов для каждой из групп. Полная статистика в каждом году составляет не менее 1.6 млн часов наблюдений для северной группы станций, более 940 тыс. час для станций, расположенных в средних широтах и свыше 760 тыс час — для экваториальных станций. Все приведенные в работе оценки статистически значимы и получены с достаточной для практики точностью.

Для определения периодов гео- и гелиомагнитной активности нами использовались индексы геомагнитной активности K_p , Dst и, для высоких широт, AE [19].

4. Полученные результаты

Для определения параметра α в формулах (3) и (4) мы воспользовались результатами работы [11], поскольку процесс определения указанных параметров крайне трудоемок. (Для величины инструментальных сбоев в 2012 г. для высоких широт в условиях суббури индекс AE достигал около 2700 nT). В [11] приводятся следующие численные величины для средних по всей наблюдательной сети значений и условий 2012 г. в Арктике со статистикой, аналогичной выбранной в нашей работе. Так, для инструментального сбоя фазы на зондирующей частоте $L1$ вероятность сбоя в максимуме, в период суббури, достигает $1.4 \cdot 10^{-3}\%$. Для фазы на частоте $L2$ она составила уже 0.12%. Для тех же условий вероятность появления скачков скорости изменения ПЭС по уровню 2 ТЕСу/мин составила порядка 0.5% (см. рис. 6 и 8 в [11]). Для отдельных станций вероятность «сбоев» для скорости ПЭС составила 2.5% (см. рис. 4). Указанные величины получены для угла возвышения на ИСЗ более 10° . Приведенные величины не противоречат допущениям нашей методики и учитываются при экспериментальной реализации методи-

ки и выборе уровня α_0 .

Для интегральной характеристики региона рассмотрим зависимости средней в течение одного часа (а также одного месяца и года) величины $I = dTEC/dt$ от времени. Эта величина в нашей постановке задачи является индикатором усредненной реакцией всего региона на гео-гелиофизические условия.

Проведенный нами анализ показывает, что распределение величины I с высокой степенью точности можно считать в среднем подчиняющимся нормальному закону. В таблице приведены вероятности проверки гипотезы о нормальном годовом распределении величины I , полученные нами для данных по различным регионам в 2010 и 2014 гг.

Таким образом, для оценки веса «хвоста» распределения в наших задачах можно пользоваться предельными величинами. Общеизвестно, что при нормальном законе распределения шумовой компоненты ПЭС для удельного веса «хвостов распределения» на уровне значимости 1σ имеем превышение в 31.7%, для 2σ — не более чем в 4.56% случаев, и для 3σ соответственно 0.28%. Под «хвостом распределения» понимается относительная доля случаев, превышающих установленный порог — например 2σ или 3σ .

Далее в работе мы примем за разумный уровень величину в $2\sigma \sim 5\%$. Статистика (см. таб.) позволяет принимать и другие, более прецизионные значения, однако в этом случае существует сложность получения устойчивых оценок для величин хвостов по формулам (2)–(3) для таких малых пороговых значений. Ясно, что уровень 2σ может достигаться в значительно возмущенных условиях на реальных наборах данных.

сравнивая результаты

Исследования, проведенные для хвостов распределений, показывают, что в наших условиях «хвосты» не являются «толстыми» [20], т.е. их асимптотики спадают быстрее, чем I^{-3} . Отметим, что на некоторых дневных выборках «хвосты» значительно отличаются от гауссова закона, особенно в высоких широтах, но все равно не являются «толстыми». Этот результат, в целом, ожидаем — во всех наших случаях дисперсия изучаемого параметра даже на одной станции в высоких широтах ограничена. Подробнее на этом мы остановимся ниже. На рис. 2 представлена временная зависимость частоты появлений значений скачков, превышающих уровень 2σ , экспериментально наблюдаемых для группы станций «Север», в 2010 и 2014 гг. соответственно. Значения усреднены по дням наблюдений в году. Именно совокупные частоты появлений скачков, больших по амплитуде указанного уровня 2σ , далее называются хвостами распределений.

Анализ полученных данных, типа представленных на рис. 2 показывает, что наибольшая вариабельность соответствует именно Арктическому региону, т.е. присуща группе станций «Север». Забегая вперед, отметим, что средний уровень мощности шумов максимален именно для северных станций арктического региона, уменьшается в средних широтах и несколько растет

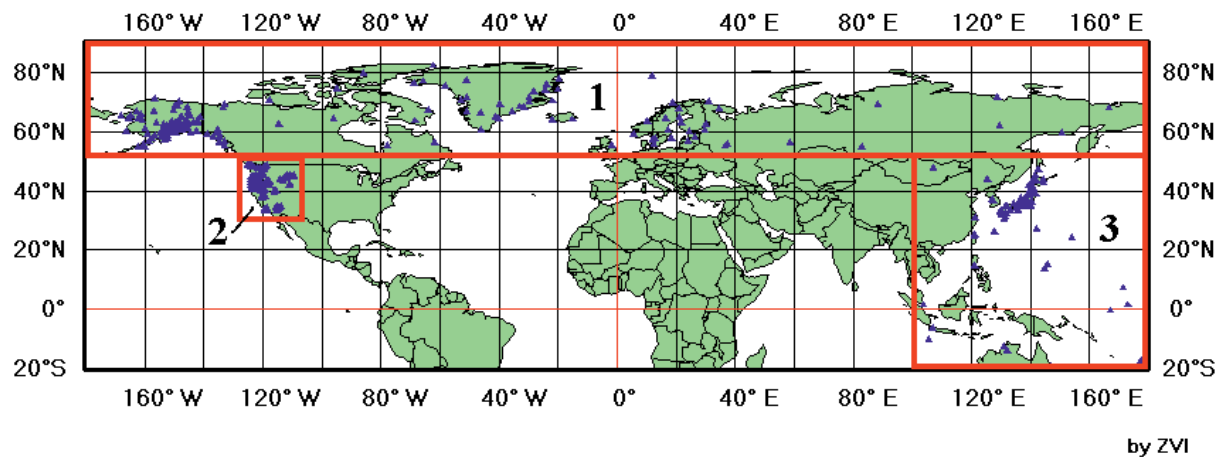


Рис. 1: Расположение групп станций, использованных в работе для анализа применимости методики. 1 — группа высокоширотных станций Север, 2 — среднеширотная группа станций, Центр, 3 — группа Юг. Положения станций отмечены треугольниками

Таблица I: Проверка гипотезы о нормальном законе распределения скачков ПЭС для разных групп станций и временных интервалов

Регион	2010 г.		2014 г.	
	Вероятность, %	Объем статистики	Вероятность, %	Объем статистики
«Север»	98.9	1407973184	96.3	1519441763
«Центр»	99.99	899640662	99.8	924433625
«Юг»	99.6	616923062	98.5	781214820

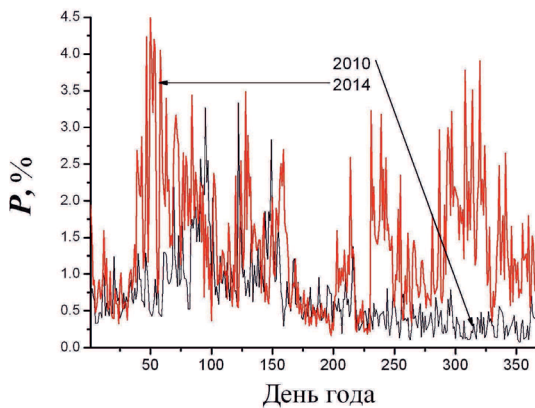


Рис. 2: Временная зависимость вероятности P появления значений скачков I , превышающих уровень 2σ и экспериментально наблюдаемых для группы станций «Север», усредненное по дням наблюдений в годах наблюдений — 2010 и 2014гг. соответственно

в экваториальных.

Отдельные наблюдаемые в течение 2010 и 2014 гг.

всплески могут быть связаны с конкретными гелио- и геофизическими явлениями, например 27.02.2014 отмечалось локальный всплеск индекса AE до 1170 nT, 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 более 0.3 для двух рассмотренных лет, что может служить подтверждением скорее случайного характера анализируемых выбросов и адекватности использования предложенной методики в целом. Иными словами, это означает, что в мы исследуем «предельную статистику», т. е. шум и собственно сбой параметра, а не его возможные информационные изменения.

Отметим, что средняя за год величина исследуемого параметра больше для 2014 г. Вероятно, это связано с тем обстоятельством, что 2010 г. является началом 24-го солнечного цикла, который характеризуется уменьшением почти вдвое солнечной активности по сравнению с предыдущим 23-м циклом. Более подробно этот результат мы обсудим ниже.

Получим оценку величины I_0 для выбранного уровня значимости именно с использованием интегральных

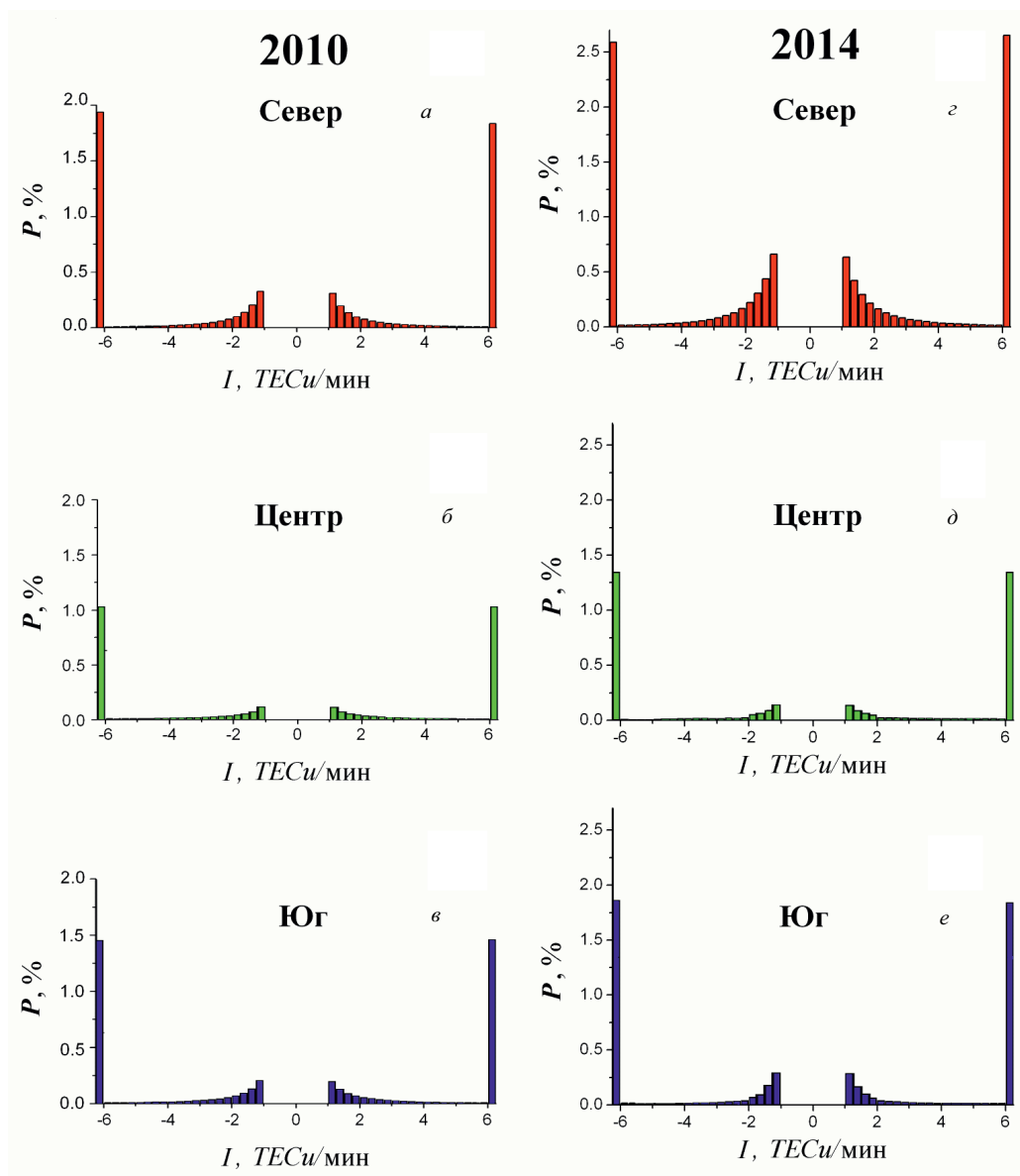


Рис. 3: Распределение P скорости изменения ПЭС по времени для двух лет — 2010 г. (а-в) и 2014 г. (z-e) и трех регионов: а, z — зависимости для региона «Север»; б, д — для региона «Центр»; в, е — для региона «Юг». Центральное тело распределения для удобства не показано

функций распределения по методике разд. 3.

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

Области распределений изучаемого параметра для величины, лежащей в интервале $[-\infty; -6 \text{ TECu/мин}]$ и $[6 \text{ TECu/мин}, \infty]$ отнесены к одной соответствующей ячейке -6 TECu/мин и 6 TECu/мин ; они и являются исследуемыми хвостами распределений. Напомним, что рассматриваемые в нашей работе объемы статистик

наблюдений достигают величин порядка и более 10^9 . При одинаковых внешних гео-гелиомагнитных условиях можно ожидать равенство законов распределения (в пределах статистических погрешностей). Однако такого не происходит, т.е. 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 (так сказать, «рога» по краям распределений) также больше для арктического региона и экваториальной атмосферы соответственно в поряд-

ке убывания своей величины. Так, из результатов двух лет — 2010 г. (рис. 3,а) и 2014 г. (рис. 3,г) соответственно, получаем, что абсолютные значения хвостов увеличиваются более чем на 15-25%. Анализ показывает, что отдельные реализации за один день могут иметь большую интенсивность до двух раз. Подчеркнем, что 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 важные соотношения в его величине для разных регионов, т.е. доказывают утверждение о том, что критерий наличия сбоя в статистическом смысле должен учитывать и географию региона. Полученная нами общая широтная динамика величины хвоста распределения следующая. Для удобства рассмотрения на рис. 3 не показано основное тело изучаемых распределений. В 2010 г. (рис. 3,а) минимальные величины хвоста наблюдались для средних широт — область (2) на рис. 1, затем следовала область экваториальных широт (Юго-Восточная Азия), для которой величина относительного веса хвоста увеличивается. И наконец, самая большая изменчивость имела место в высоких северных широтах — область 1. Общий вклад хвостов составил менее 3.5%.

В 2014 г. ситуация меняется. Для усредненных величин значительно возросли вариации больших значений в распределении, как это видно на рис. 3,г. Доля вариаций по абсолютному значению более 1 ТЕСу/мин возросла почти вдвое. Это является следствием проявления гео-гелиомагнитной активности, т.е. информационно-значимым событием, а не сбоем в статистическом смысле этого слова. В это время доля хвостов увеличилась почти на 30% и составила в целом от 3% до 5% от полной величины распределения — соответственно для станций группы Центр и группы Север. Это следует из попарного сравнения рис. 3,а-г, б-д, в-е. Видно, что предложенный уровень 2σ представляет собой оптимальную величину для исследований собственно сбоев как редких событий.

Выводы о применимости гауссовой статистики для оценки редких событий в различных широтных регионах и (т.е. отсутствием у исследуемых распределений «толстых» или «тяжелых» хвостов) подтверждаются исследованиями распределений дисперсии для эмпирических законов распределений. На рис. 4 представлены функции распределения суточных величин дисперсии I за 2014 г. Численно эти распределения лежат в диапазонах 1, ..., 4 ТЕСу/мин для региона 1, 0.4, ..., 2.6 для региона 3 и 0.2, ..., 2 для региона 2. Полученные что эмпирические распределения ограничены, т.е. оценки на основе гауссовой статистике справедливы в среднем. Конечно, отдельные реализации в конкретных условиях носят негауссов характер. Вероятно, динамика ионосферного шума формируется под влиянием нескольких, возможно конкурирующих, факторов.

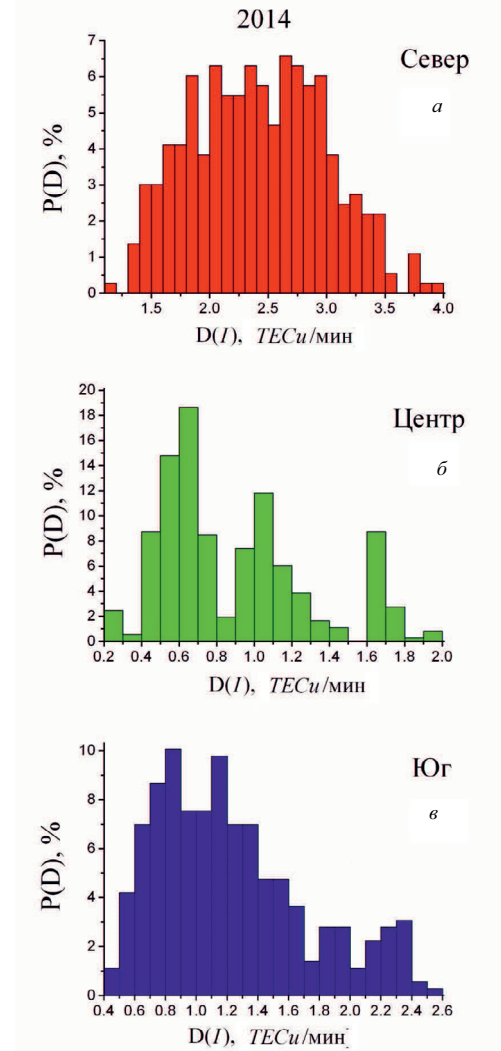


Рис. 4: Распределения величины ежедневной дисперсии D изучаемой величины $I = dTEC/dt$ в 2014 г. для разных регионов: а — север, Арктика, б — центр, в — Юг, Юго-восточная Азия и Япония

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты разработки и эмпирического обоснования статистического критерия определения уровня сбоев ПЭС по данным GPS наблюдений.

Нами проведен экспериментальный анализ применимости предложенного критерия для данных в арктическом, среднеширотном и экваториальном регионах, причем использованы наблюдения на ~ 400 станциях в течение 2010 и 2014 гг. Общая длительность наблюдений составила более 1.6 млн часов для арктического региона, более 940 тыс. час для станций, расположенных в средних широтах и свыше 760 тыс. час — для приэкваториальных станций.

Показано, что с высокой степенью вероятности распределения скорости изменения ПЭС по времени явля-

ются нормальными. В качестве оптимальной величины для дальнейшего оценивания обоснован выбор уровня, соответствующего интервалу 2σ . Проведены оценки частот появления скачков, превышающих выбранный уровень для различных временных разбиений. Показано, что в различных широтных зонах свой уровень флуктуаций, превышающий выбранную величину 2σ ; он варьируется в течение года.

Наши результаты определяют численную величину порога, с которого измеряемые величины могут считаться статистическим шумом. Эта величина за-

висит от широты местоположения региона наблюдения. Предложенный подход позволяет определять уровень сбоя более корректно, поскольку не относит к сбоям определяемую по навигационным сигналам GPS/GLONASS и изучаемую разными методами реакцию ионосферы на различные гео-, гелиофизические условия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФ 14-17-00637. Часть работ, связанная с анализом высокоширотных данных, выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-01814.

- [1] *Demyanov V. V., Yasyukevich Yu. V. // GPS solutions.* 2012. **16**, N2. P.181.
- [2] *Mannucci P. X., Lindqwister A. J., Ho U. J. // Geophys. Res. Lett.* 1997. **2**, N18. P.2283.
- [3] *Афраймович Э. Л., Гаврилюк Н. С., Демьянов В. В., Ишин А. Б. и др. // Космич. иссл.* 2009. **47**, №2. С.146. (*Afraimovich E. L., Demyanov V. V., Gavrilyuk N. S. et al. // Cosmic Research.* 2009. **47**, N2. 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 Krishna S., Vara Prasad J., Prasad S. N. V. S. et al. // Ann. Geophys.* 2009. **27**. P.2101.
- [7] *Bergeot, N., Bruyninx C., Defraigne P., Pireaux S. et al. // GPS solutions.* 2011. **15**. P171.
- [8] *Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., Zhivetiev S. I. // Space Weather.* 2014. **12**, N7. P508.
- [9] *Mushini S. C., Jayachandran P. T., Langley R. B., Pokhotelov D. // GPS Solutions.* 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. Иссл.* 2016. **54**, №1. С1. (*Zakharov V. I., Yasyukevich Yu. V., Titova M. A. // Cosmic Research.* 2016. **54**, N1. P.20.)
- [12] *Ясюкевич Ю. В., Воейков С. В., Живетьев И. В., Косогоров Е. А. // Космич. Иссл.* 2013. **51**, №2. С.125. (*Yasyukevich Y. V., Voeykov S. V., Kosogorov E. A., Zhivetiev I. V. // Cosmic Research.* 2013. **51**, N2. P.114.)
- [13] *Куницын В. Е., Назаренко М. О., Нестеров И. А. и др. // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2015. **70**, №4. С.95. (*Kunitsyn V. E., Nazarenko M. O., Nesterov I. A. et al. // Mosc. Univ. Phys. Bull.* 2015. **70**. P.312.)
- [14] *Kozyreva O. V., Pilipenko V. A., Zakharov V. I., Engebretson M. J. // GPS Solutions.* 2017.
- [15] *Hoffman-Wellenhoft B. GPS Theory and Practice.* New York: Springer-Verlag, 1998.
- [16] *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.)
- [17] www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR_2012_Ischkov.pdf
- [18] <http://www.sopac.ucsd.edu>
- [19] <http://wdc.kugi.kuoto-u.ac.jp/dstae/index.html>
- [20] *Bahat D., Rabinovitch A., Frid V. Tensile Fracturing in Rocks: Tectonofractographic and Electromagnetic Radiation methods.* Berlin: Springer-Verlag.
- [21] *Захаров В. И., Ясюкевич Ю. В., Носикова Н. С. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* В печати.

Construction of a method for statistical definition of the slips level of total electron content by using GPS observations.

V. I. Zakharov^{1,2,a}, Y. V. Yasyukevich^{2,b}, V. E. Pronin^{1,c}.

¹Department of Physics of atmosphere, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

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

E-mail: ^azvi_555@list.ru, ^byasyukevich@iszf.irk.ru, ^ctolgamrab@yandex.ru

The paper proposes a method for determining the level above which can be considered a slips in determining the time rate of total electron content (TEC). The method is based on a statistical estimation of the properties of the distribution for the studied parameter. The aim of the method is the experimental determination of the threshold values of TEC jumps, associated with the «tails» of the studied distributions for a given physically adequate level of significance defined by latitudinal properties of geo- and heliophysical conditions. It was found that the threshold value (from which the measured values can be considered as statistical noise) depends on the latitude of the observation region. The maximum of threshold is for the Arctic region, minimum — to the middle latitude band stations. The method application performed for different sets of 400 IGS network stations located in the high (200 plants), middle (over 100) and equatorial latitudes (over 100 stations) respectively. The test methodics is conducted for the

2010 and 2014 in a variety of geo- and heliophysical conditions and phases of the solar cycle 24. As the level of significance we selected range «two dispersions».

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

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

Received 08 January 2017.

Сведения об авторах

1. Захаров Виктор Иванович — доцент; e-mail: zvi_555@list.ru.
2. Ясюкевич Юрий Владимирович — ст. науч. сотрудник ИСЗФ СО РАН; тел.: 8(914) 882-81-49, e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru.
3. Пронин Владимир Евгеньевич — аспирант; e-mail: tolgamrab@yandex.ru.