УДК 550.388.2

 $DOI: 10.52452/00213462\_2020\_63\_11\_942$ 

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОТОЧЕЧНОГО ПРИЁМА СИГНАЛОВ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОМАЯКОВ ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Е. С. Андреева, М. О. Назаренко, <u>И. А. Нестеров</u>, А. М. Падохин<sup>\*</sup>, Н. А. Терешин, Ю. С. Туманова

Московский госуниверситет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Предложена методика обработки данных одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков для локальной оценки ионосферных параметров (вертикальное полное электронное содержание и критические частоты  $f_{0F_2}$ ) в окрестности приёмной станции. На примере данных измерений двух приёмников, расположенных в Москве и Гаконе (Аляска, США), продемонстрированы возможности данной методики. Проведено сравнение критических частот  $f_{0F_2}$ , вычисленных по данным приёмников спутниковых сигналов и по данным ионозондов, расположенных в Москве и Гаконе. Коэффициенты корреляций данных ионозондов и спутниковых данных, обработанных предложенным методом, составляют 0,85÷0,86. Обсуждается возможность построения локальных индикаторов степени возмущённость.

## введение

Многоточечный приём сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков на паре когерентных рабочих частот при использовании меридионально ориентированных цепочек приёмных станций является измерительной основой низкоорбитальной радиотомографии ионосферы. Данный метод позволяет получать двумерные сечения ионосферы вдоль траекторий пролёта низкоорбитальных спутников [1]. При отсутствии технических возможностей развернуть измерительную цепочку с необходимым для радиотомографии количеством приёмников (или поддерживать их одновременное функционирование) возникает вопрос об альтернативных вариантах использования данных локальных одноточечных измерений для целей мониторинга состояния ионосферы.

Отметим, что данные одноточечного приёма сигналов высокоорбитальных глобальных спутниковых навигационных систем (GPS/ГЛОНАСС/Galileo/Beidou) в настоящее время широко используются в ионосферных исследованиях [2, 3]. Разработаны эффективные методы оценки вертикального полного электронного содержания (vertical total electron content, VTEC) по данным одиночных приёмников [4], а также индексов ионосферной возмущённости, преимущественно основанные на рассмотрении производных по времени от локальных оценок относительного наклонного полного электронного содержания (Slant TEC, STEC). Наиболее широко применяются индексы ROT и ROTI [5], AATR [6], DIX/DIXSG [7], WTEC [8]. К общим проблемам использования индексов такого рода следует отнести трудности в разделении вклада пространственной и временной изменчивости ионосферы за счёт сравнительно невысокой скорости движения подыоносферных точек спутников глобальных спутниковых навигационных систем. Отчасти эта проблема может быть решена с использованием геостационарных спутников систем дифференциальной коррекции [9, 10] и новых навигационных систем, например китайской системы Beidou [11, 12], позволяющих выделить вклад временной изменчивости ионосферы в наблюдаемую возмущённость. Быстро движущиеся подьоносферные точки низкоорбитальных спутников, в свою

<sup>\*</sup> padokhin@physics.msu.ru

очередь, дают пространственную развёртку ионосферных структур, поэтому локальный низкоорбитальный индикатор возмущённости также может быть полезен, т. к. даёт возможность рассмотреть пространственную изменчивость ионосферы. Заметим, что основанные на анализе пространственных особенностей распределения электронной концентрации в ионосфере индикаторы возмущённости, базирующиеся на многоточечном приёме, — как радиотомографические индикаторы [13], так и индикаторы, построенные по глобальным ионосферным картам GIM [14, 15], а также карты индексов ROTI [16] и AATR [17] — продемонстрировали высокую чувствительность к факторам геомагнитной возмущённости. Таким образом, естественно предположить, что одноточечный индикатор, основанный на низкоорбитальных данных, также может испытывать влияние этих факторов. Отметим также планируемый запуск большого числа низкоорбитальных спутников в рамках системы Beidou [18].

В связи с этим ранее не ставившаяся задача разработки методики использования одноточечных измерений сигналов низкоорбитальных радиомаяков для оценки ионосферных параметров, прежде всего VTEC, представляется весьма актуальной. Вариации TEC вдоль траектории пролёта спутника дают возможность, в свою очередь, оценить степень пространственной неоднородности ионосферы. Среднеквадратичное отклонение VTEC от фонового тренда можно рассматривать как индикатор наличия в ионосфере квазиволновых возмущений (назовём его локальным низкоорбитальным индикатором волновой возмущённости).

Данная работа посвящена обсуждению возможностей использования и построению методики обработки данных одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков для локальной оценки ионосферных параметров вблизи приёмной станции. Рассматриваются основные проблемы, связанные с анализом данных одноточечного приёма, способы их решения и практические примеры оценок ионосферных параметров в сопоставлении с независимыми данными ионозондовых измерений, а также возможности построения индикаторов возмущённости ионосферы.

# 1. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ОДНОТОЧЕЧНОМУ ПРИЁМУ СИГНАЛОВ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ РАДИОМАЯКОВ

Физической основой радиопросвечивания ионосферы является использование радиосигналов, непрерывно излучаемых спутниковыми радиомаяками на нескольких когерентных частотах. Эти частоты принадлежат диапазонам, для которых адекватно использование следующих допущений:

1) можно пренебречь влиянием магнитного поля Земли на распространение радиоволн (частота волны гораздо больше гирочастоты);

2) можно пренебречь дифракционными эффектами (длина волны достаточно мала по сравнению с масштабами выявляемых неоднородностей) и использовать приближение геометрической оптики;

3) можно пренебречь влиянием поглощения (частота волны гораздо больше эффективной частоты соударений);

4) плазменная частота много меньше частоты радиосигналов, и вследствие этого можно приближённо считать показатель преломления линейно зависящим от электронной концентрации, а также пренебречь отклонением траектории луча от прямой.

Отметим, что данные приближения в целом справедливы для сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков, которые традиционно используют когерентные рабочие частоты 150 и 400 МГц [1].

В этих приближениях становится возможным использование двухчастотного метода, позволяющего выделить вклад ионосферы в фазовые задержки радиосигналов при их распространении от спутника до наземного приёмника [1]:

$$\lambda r_e \int_{l} N(r,t) \, \mathrm{d}l = \Phi = \phi + \phi_0. \tag{1}$$

Здесь N — электронная концентрация,  $r_e$  — классический радиус электрона,  $\lambda$  — длина волны для приведённой частоты,  $\Phi$  — абсолютная приведённая фаза, а интеграл берётся вдоль луча l, соединяющего спутник и приёмник. Следует отметить, что в экспериментах измеряется относительная приведённая фаза  $\phi$ , равная абсолютной с точностью до некоторой неизвестной начальной фазы  $\phi_0$ . Отметим, что величина  $\phi$  является изменением фазы на одной рабочей частоте относительно изменения фазы на второй рабочей частоте, приведённым к опорной частоте [1]. Таким образом, уравнение (1) полностью эквивалентно известному выражению для двухчастотной комбинации фазовых данных глобальных спутниковых навигационных систем  $L_1$  и  $L_2$ , используемому для оценки относительного наклонного полного электронного содержания [4].

Согласно (1) в результате измерений можно получить значения наклонного TEC вдоль лучей спутник–приёмник с точностью до аддитивной константы. Одной из постановок обратной задачи в данной ситуации может являться оценка вертикального VTEC над приёмной станцией на основе имеющейся информации. Основной проблемой использования экспериментальных данных при этом является наличие неизвестной константы в результатах измерений.

В задачах радиотомографии ионосферы для того, чтобы избавиться от неизвестных констант в формуле (1), используют так называемый фазоразностный подход, который заключается в следующем. Путём перехода от интегралов по отдельным лучам к разностям этих интегралов по парам близких лучей из одного пучка полностью исключаются из рассмотрения неизвестные константы [19, 20]. Отдельные инструменты решения радиотомографических задач остаются применимыми и после такого изменения их постановки (некоторые итерационные алгоритмы, основанные на идее обратных проекций) и таким образом проблема неизвестной фазовой константы снимается использованием фазоразностного подхода.

В случае одноточечного приёма такой подход не применим, т. к. не существует общей постановки задачи, которая использует множественность наборов данных для компенсации недостающей информации. Поэтому оценку неизвестной фазовой константы в данном случае необходимо провести явно, исходя из предположений, не выходящих за рамки описания одноточечного приёма.

Время пролёта низкоорбитального спутника в зоне видимости приёмника составляет порядка 10÷20 мин. Изменением состояния ионосферы за это время можно пренебречь. Кроме того, интеграл по наклонному лучу спутник-приёмник сильно зависит от угла его наклона. Если бы ионосфера была неизменной, сферически симметричной, а также представляла собой тонкий слой, то величина наклонного TEC была бы пропорциональна  $\cos^{-1}\beta$ , где  $\beta$  — зенитный угол луча в точке пересечения тонкого слоя. Таким образом, по вариации STEC во время пролёта спутника можно было бы определить значение неизвестной константы в данных на основе критерия близости этой зависимости к  $\cos^{-1}\beta$ . Однако предположение о сферической симметричности ионосферы является слишком грубым, когда спутник движется вдоль меридиана (здесь и далее мы рассматриваем низкоорбитальные спутниковые радиомаяки на полярных орбитах), поскольку зависимость ионосферных параметров от широты может быть весьма существенной. В первом приближении эту зависимость можно принять линейной, что, конечно же, остаётся весьма неточным (экваториальная аномалия в низких широтах и главный ионосферный провал в высоких широтах вызовут заметное отклонение от линейного хода на границах среднеширотной области), но уже является более предпочтительным, чем приближение константой.

Итак, для оценки неизвестной фазовой константы примем три приближения.

- 1) За время пролёта низкоорбитального спутника состояние ионосферы не изменяется.
- 2) Ионосфера представима тонким слоем с высотой h, т.е. выполняется условие

$$STEC \approx VTEC/\cos\beta.$$
 (2)

3) Зависимость VTEC от широты  $\varphi$  вдоль всего пролёта спутника близка к линейной:

$$VTEC \approx a + b\varphi, \tag{3}$$

где *а* и *b* — константы.

Истинное значение STEC отличается от измеренного относительного значения  $STEC_0$  на неизвестную константу *c*:

$$STEC = STEC_0 + c.$$
(4)

Таким образом, получаем

$$(\text{STEC}_0 + c)\cos\beta \approx a + b\varphi.$$
(5)

Найдём константы a, b, c, минимизируя (в норме  $L_2$ ) невязку уравнения (5):

$$\min_{a,b,c} \int \left\{ a + b\varphi(t) - [\operatorname{STEC}_0(t) + c] \cos\beta(t) \right\}^2 \mathrm{d}t.$$
(6)

Ввиду квадратичной зависимости минимизируемого выражения от a, b, c, нахождение этих величин сводится к решению системы линейных уравнений. После того, как константы a, b, c найдены из задачи (6), значения VTEC в точках прокола можно оценить как

$$VTEC(t) \approx [STEC_0(t) + c] \cos \beta(t).$$
(7)

Величина соз  $\beta$  элементарным образом выражается через известный косинус зенитного угла луча в точке приёма. Поскольку по своему физическому смыслу значения VTEC не могут быть отрицательными, то константу *c* определим таким образом, чтобы выполнялось условие  $\min_t \text{VTEC}(t) = 0$ .

Таким образом, в рамках рассмотренных грубых приближений оказывается возможным, вопервых, оценить неизвестную аддитивную константу в данных одноточечного приёма и, вовторых, на этой основе дать оценку VTEC вдоль траектории спутника. Отметим, что рассматриваемый метод с незначительными изменениями применим и при однократном срыве сопровождения фазы при условии, что оба интервала непрерывности данных достаточно велики. В таком случае вместо одной неизвестной аддитивной константы, связанной с неизвестной начальной фазой, в ходе минимизации (6) необходимо будет оценить две такие константы. Альтернативным подходом может служить устранение однократного срыва сопровождения фазы по условию непрерывности фазы. Отметим также, что в формуле (2) возможно использование других картирующих функций для получения значений STEC из значений VTEC, например модифицированной однослойной модели, как это сделано в работе [4]. Однако применение этих функций хорошо исследовано и оправдано в случае среднеорбитальных спутников глобальных спутниковых навигационных систем, для которых существенен вклад плазмосферы в полное электронное содержание. Кроме того, при используемых в данной работе углах возвышения более 15° различные варианты задания картирующих функций будут давать близкие значения, а возможный вклад в ошибку оценки VTEC будет меньше ошибки, вызванной предположением о линейном широтном ходе VTEC.

Значения VTEC над приёмной станцией можно принять за основной результат методики анализа данных одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных радиомаяков. Отметим, что, используя эффективную толщину ионосферного слоя  $\Delta h$  (slab thickness), по данным VTEC можно оценить и критическую частоту  $f_{0F_2}$  [21]. При этом используемые в расчётах высо́ты тонкого слоя h и его характерные толщи́ны  $\Delta h$  можно задать константами из априорных соображений, или использовать данные ионосферных моделей, например IRI-2016 [22].

Широтная зависимость VTEC является дополнительным продуктом методики и может служить для оценки уровня пространственной неоднородности ионосферы. Отметим, что такая постановка задачи близка изложенной в работе [4] для случая одноточечного приёма сигналов глобальных спутниковых навигационных систем, с той лишь разницей, что в [4] используется более сложная модель задания VTEC в тонком слое и вместо неизвестной начальной фазы оцениваются дифференциальные кодовые задержки приёмника и спутников GPS/ГЛОНАСС.

Полученные по формуле (7) значения VTEC могут быть использованы для анализа вариаций широтного хода ионосферы, в частности для выявления волновых возмущений. Исключим из VTEC линейную часть (3),

$$VTEC^* = VTEC - (a + b\varphi), \tag{8}$$

а затем вычтем скользящее среднее по широте с параболическим окном полушириной  $2^{\circ}$ ,  $\langle VTEC^* \rangle$ :

$$\Delta \text{VTEC} = \text{VTEC}^* - \langle \text{VTEC}^* \rangle. \tag{9}$$

Выделенную вариацию ΔVTEC можно проанализировать с целью выявления характерных амплитуд и длин волн волновых возмущений ионосферы, распространяющихся в широтном направлении. С другой стороны, полученную вариацию можно использовать для оценки усреднённой квазиволновой возмущённости ионосферы вдоль траектории пролёта низкоорбитального спутника, например усреднив вариацию VTEC по времени записи принимаемого сигнала в среднеквадратичном смысле:

wa
$$(t_i) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_i - T/2}^{t_i + T/2} \Delta \text{VTEC}^2(t') \, \mathrm{d}t'},$$
 (10)

где  $t_i$ — момент середины *i*-й записи. Этот параметр может быть использован как индикатор степени возмущённости ионосферы, вызванной влиянием различных факторов (космическая погода, геомагнитная возмущённость, процессы в нижней атмосфере и т. д.). Можно предположить, что основными причинами проявления квазиволновой возмущённости будут являться, во-первых, суточная динамика ионосферы и, во-вторых, влияние геомагнитной возмущённости. Имея достаточно продолжительные ряды данных одноточечного приёма, вклад суточной динамики ионосферы можно оценить, усреднив величины wa $(\tilde{t}_i) = wa(t_i - [t_i])$  ( $[t_i]$  — время, выраженное в целом числе суток) по внутрисуточному времени  $\tilde{t}_i$  с окном усреднения в 1÷2 часа. Получив таким образом средний суточный ход квазиволновой возмущённости  $\overline{wa}(\tilde{t})$ , который и сам по себе может представлять интерес для анализа процессов в ионосфере, можно попытаться исключить его влияние с целью лучшего выявления воздействия внешних возмущающих факторов на фоне суточной динамики. Это можно сделать, в частности, нормировав квазиволновую возмущённость на средний суточный ход:

$$\delta \operatorname{wa}(t_i) = \operatorname{wa}(t_i) / \overline{\operatorname{wa}}(t_i - [t_i]).$$
(11)

Полученная величина относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$ wa $(t_i)$  далее может быть сопоставлена с количественными характеристиками возмущающих факторов, в частности со значениями геомагнитных индексов.

Е.С. Андреева, М.О. Назаренко, И.А. Нестеров и др

Таким образом, помимо оценки VTEC и критической частоты  $f_{0F_2}$  предлагаемая методика использования данных одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков даёт возможность построения локальных индикаторов степени возмущённости ионосферы, которые могут быть полезны как для теории (с целью выявления взаимосвязи ионосферы с магнитосферой, космической погодой, процессами в нижней атмосфере и т. д.), так и для практики (как средство мониторинга различных возмущающих факторов).

#### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ПРИМЕРЫ РАБОТЫ МЕТОДИКИ

В работе проанализированы данные двух приёмных пунктов сигналов низкоорбитальных радиомаяков. Первый среднеширотный пункт (MOS) расположен в г. Москва (географические координаты: 55,707° с. ш., 37,523° в. д., геомагнитная широта 51,07°) и оснащён приёмником АДК-4М [1]. Данный пункт принимал сигналы низкоорбитальных спутников российской навигационной системы «Парус». Второй высокоширотный пункт (GKN) находится на Аляске (США) в г. Гакона (географические координаты: 62,399° с. ш., 145,157° з. д., геомагнитная широта 63,45°) и оснащён приёмником NWRA ITS20s. Данный пункт регистрировал сигналы низкоорбитальных спутников американской навигационной системы Transit. Спутники обеих систем имели почти круговую полярную орбиту с высотой над Землей около 1000÷1150 км, а период их обращения составлял порядка 110 минут. Они излучали сигналы на двух когерентных частотах 150 и 400 МГц с различными отстройками от номинальной частоты, что позволяло выделить ионосферную часть фазовой задержки согласно (1). Для рассматриваемых приёмников устойчивый захват сигнала наступал примерно на второй-третьей минуте пролёта и длился примерно до 16-й минуты. Интервал между пролётами зависел от числа функционирующих спутников и в период максимального развития спутниковой группировки составлял около 20 мин. В настоящее время обе системы («Парус» и Transit) выведены из эксплуатации, а описываемые наблюдения возможны с использованием отдельных научных спутников, например ePOP/Cassiope [23, 24]. Это существенно увеличило время между последовательными пролётами и, соответственно, ухудшило временное разрешение. Тем не менее, рассматриваемые эксперименты сохраняют свою актуальность в связи с планируемым запуском большого числа низкоорбитальных спутников в рамках системы Beidou [18].

На основе данных измерений двух рассматриваемых приёмных пунктов были протестированы возможности предлагаемой методики в двух аспектах:

1) возможности оценки VTEC и критической частоты  $f_{0F_2}$  в сравнении с данными ближайших ионозондов сети GIRO [25];

2) возможности оценки квазиволновой возмущённости ионосферы при различных уровнях геомагнитной активности.

### 2.1. Приёмный пункт МОЅ

Для данных одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных радиомаяков на приёмном пункте MOS за период с января по март 2013 года построены оценки VTEC, критической частоты  $f_{0F_2}$  и относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$  wa в соответствии с вышеописанной методикой. Полученные оценки  $f_{0F_2}$  сопоставлены с данными ионозонда MO155 сети GIRO.

Средний суточный ход критической частоты  $f_{0F_2}$ , полученный по данным приёмника MOS, качественно и количественно достаточно хорошо согласуется с данными ионозонда (см. рис. 1). Совместное распределение оценки  $f_{0F_2}$  по данным приёмника MOS и по данным ионозонда показано на рис. 2. Для каждого пролёта низкоорбитального спутника соответствующее значение  $f_{0F_2}$ 



Рис. 1. Средний суточный ход критической частоты  $f_{0F_2}$  на основе данных приёмника (a) и по данным ионозонда (b). Москва (точное местное время опережает UT на 2,5 часа), январь-март 2013 года

ионозонда вычислялось как результат линейной интерполяции по времени между ближайшими измерениями ионозонда (при этом, если одно из ближайших измерений было в данных ионозонда маркировано как отсутствующее, то данный пролёт спутника исключался из рассмотрения). Коэффициент корреляции между данными одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных радиомаяков и данными ионозонда за рассматриваемый период оказался равен 0,86, т. е. наблюдается сильная коррелированность. При использованном объёме выборки для уровня значимости  $\alpha = 0,01$  критерий статистической значимости наличия корреляции составляет 0,12.



Рис.2. Сравнение значений  $f_{0F_2}$ , вычисленных по данным приёмника  $(f_{0F_2}^r)$  и ионозонда  $(f_{0F_2}^{(I)})$ . Москва, январь–март 2013 года. Коэффициент корреляции 0,86

При построении оценки  $f_{0F_2}$  параметры высоты тонкого слоя и характерной толщины ионосферного слоя задавались константами: h == 350 км и  $\Delta h = 250$  км. Кроме того, были вычислены варианты оценки  $f_{0F_2}$  с другими значениями констант, а также с использованием суточного хода этих величин, взятого из модели IRI-2016 [22]. При этом выяснилось, что метод слабо чувствителен к выбору параметров ионосферного слоя, а использование модельных значений вместо постоянных не увеличивает коррелированность получаемых оценок с данными ионозонда. Это говорит о том, что предложенный метод слабо чувствителен к ошибкам в задании высотных параметров ионосферного слоя и аналогичных им ошибок, связанных с непрямолинейным распространением радиосигнала в ионосфере (согласно [1] для частоты 150 МГц отклонение от прямолинейного распространения для

квазикасательных лучей может составлять до 10 км), основной вклад в ошибку при этом вносит достаточно грубое приближение линейной широтной зависимости VTEC.

Были вычислены оценки относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$ wa, и её значения сопоставлены с геомагнитными индексами  $K_{\rm p}$  и  $D_{\rm st}$  (см. рис. 3). Из рис. 3 видно, что, с одной стороны, относительная квазиволновая возмущённость повышается при значительной геомагнитной



Рис. 3. Сопоставление относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$  wa (маркеры) со значениями геомагнитных индексов (линии)  $K_{\rm p}$  (*a*) и  $D_{\rm st}$  (*б*). Москва, январь–март 2013 года, дни отсчитываются от 01.01.2013



Рис. 4. Корреляционная функция относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$  wa и значений геомагнитных индексов  $K_p(a)$  и  $D_{st}(b)$ . Москва, январь–март 2013 года

возмущённости, но, с другой стороны, она может также достигать больши́х значений и в геомагнитно-спокойные периоды (первая половина января 2013 года), т. е. определяться и иными возмущениями, отличными от геомагнитных. Для анализа коррелированности квазиволновой возмущённости  $\delta$  ча со значениями геомагнитных индексов были построены взаимные корреляционные функции (рис. 4). Учёт возможного сдвига по времени между квазиволновой,  $\delta$  ча, и геомагнитной возмущённостями (для чего и нужно рассмотрение корреляционных функций) необходим из-за того, что как процессы возмущения геомагнитного поля, так и процессы генерации волн в ионосфере занимают время порядка нескольких часов и их проявления могут быть рассогласованы по времени. На рис. 4 показаны корреляционные функции между значениями  $\delta$  ча и  $K_{\rm p}$  и  $D_{\rm st}$ , при этом максимальная корреляция  $\delta$  ча с индексом  $K_{\rm p}$  составляет 0,26 и с индексом  $D_{\rm st} - 0,18$ (критерий значимости 0,12). Таким образом, наблюдается слабая, но статистически значимая корреляция квазиволновой возмущённости  $\delta$  ча с геомагнитной возмущённостью.

Также были проанализированы данные приёмника MOS для периода супербури в конце октября 2003 года. Ионозонд в это время практически не работал из-за сильной возмущённости ионосферы, поэтому приведём только результаты оценки относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$ wa. Её сопоставление с индексами геомагнитной возмущённости показано на рис. 5.



Рис. 5. Сопоставление относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$  wa (маркеры) со значениями геомагнитных индексов (линии)  $K_{\rm p}$  (*a*) и  $D_{\rm st}$  (*б*). Москва, октябрь 2003 года, дни отсчитываются от 01.01.2003



Рис. 6. Корреляционная функция относительной квазиволновой возмущённости и значений геомагнитных индексов  $K_{\rm p}$  (*a*) и  $D_{\rm st}$  (*б*). Москва, октябрь 2003 года

На рис. 6 приведены корреляционные функции для  $\delta$ wa и значений индексов  $K_{\rm p}$  и  $D_{\rm st}$ . Максимальная корреляция  $\delta$ wa с индексом  $K_{\rm p}$  составляет 0,44 и с индексом  $D_{\rm st}$  -0,59 (критерий значимости 0,16). Из рис. 5 видно, что супербуря в конце октября 2003 года, когда геомагнитные индексы  $K_{\rm p}$  и  $D_{\rm st}$  достигали экстремальных значений ( $K_{\rm p} = 9$ ,  $D_{\rm st} \approx -400$  нTл), чётко выявляется и в значениях относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$ wa. Таким образом, можно сделать вывод, что последняя хорошо воспроизводит наличие высокой геомагнитной возмущённости, но гораздо менее чувствительна к средней геомагнитной возмущённости.

#### 2.2. Приёмный пункт GKN

Аналогичным образом были проанализированы данные измерений высокоширотного приёмника GKN и соотнесены с данными ионозонда GA762 сети GIRO за период с января по март 2002 года (за этот период в достаточном объёме имелись как данные одноточечного приёма, так и данные ионозонда). Средний суточный ход критической частоты  $f_{0F_2}$ , полученный по данным приёмника GKN, показан на рис. 7 в сравнении с данными ионозонда. Совместное распределе-

Е.С. Андреева, М.О. Назаренко, И.А. Нестеров и др



Рис. 7. Средний суточный ход критической частоты  $f_{0F_2}$  на основе данных приёмника (a) и по данным ионозонда (b). Гакона (точное местное время отстаёт от UT на 9,7 часов), январь-март 2002 года

ние значений  $f_{0F_2}$  по данным приёмника и данным ионозонда показано на рис. 8. Коэффициент корреляции между этими значениями равен 0,85 (критерий значимости 0,08), т.е. практически равен коэффициенту корреляции для приёмного пункта MOS.

Сопоставление значений относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$ wa с геомагнитными индексами  $K_{\rm p}$  и  $D_{\rm st}$  показано на рис. 9. Аналогично приведённым выше данным пункта MOS, относительная квазиволновая возмущённость  $\delta$ wa pearupyet на значительные повышения геомагнитной возмущённости, хотя может зависеть и от иных факторов. На рис. 10 изображены взаимные корреляционные функции для значений  $\delta$ wa и индексов  $K_{\rm p}$  и  $D_{\rm st}$ . Максимальная корреляция  $\delta$  wa с индексом  $K_{\rm p}$  составляет 0,48, с индексом  $D_{\rm st}$  -0,39 (критерий значимости 0,08), что существенно выше, чем для данных среднеширотного пункта MOS. Таким образом, в высоких широтах связь с геомагнитной возмущённостью может быть более существенной, чем в средних.



Рис. 8. Сравнение значений  $f_{0F_2}$ , вычисленных по данным приёмника  $(f_{0F_2}^{\rm r})$  и ионозонда  $(f_{0F_2}^{\rm (I)})$ . Гакона, январь–март 2002 года. Коэффициент корреляции 0,85

Для периода супербури в конце октября 2003 года сопоставление оценки относительной квази-

волновой возмущённости  $\delta$  wa с индексами геомагнитной возмущённости показано на рис. 11. Соответствующие корреляционные функции для  $\delta$  wa и значений индексов  $K_{\rm p}$  и  $D_{\rm st}$  приведены на рис. 12. Максимальная корреляция с индексом  $K_{\rm p}$  составляет 0,60 и с индексом  $D_{\rm st} - 0,72$ (критерий значимости 0,15), что также выше, чем для пункта MOS.

Не претендуя на исчерпывающее и обоснованное объяснение наблюдаемых эффектов, отметим только, что предложенный инструментарий оценки относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$  wa по одноточечным данным низкоорбитальных спутниковых радиомаяков может быть полезен для анализа динамики ионосферы как в спокойных, так и в возмущённых условиях.

Е. С. Андреева, М. О. Назаренко, И. А. Нестеров и др



Рис. 9. Сопоставление относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$  wa (маркеры) со значениями геомагнитных индексов (линии)  $K_{\rm p}$  (a) и  $D_{\rm st}$  (б). Гакона, январь–март 2002 года, дни отсчитываются от 01.01.2002



Рис. 10. Корреляционная функция относительной квазиволновой возмущённости и значений геомагнитных индексов  $K_{\rm p}$  (*a*) и  $D_{\rm st}$  (*б*). Гакона, январь–март 2002 года



Рис. 11. Сопоставление относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$  wa (маркеры) со значениями геомагнитных индексов (линии)  $K_{\rm p}$  (*a*) и  $D_{\rm st}$  ( $\delta$ ). Гакона, октябрь 2003 года, дни отсчитываются от 01.01.2003

Е.С. Андреева, М.О. Назаренко, И.А. Нестеров и др



Рис. 12. Корреляционная функция относительной квазиволновой возмущённости  $\delta$  wa со значениями геомагнитных индексов  $K_{\rm p}(a)$  и  $D_{\rm st}(\delta)$ . Гакона, октябрь 2003 года



Рис. 13. Суточный ход квазиволновой возмущённости: Москва, январь–март 2013 года, (*a*) и Гакона, январь–март 2002 года, (*б*)

#### 2.3. Суточный ход квазиволновой возмущённости

В приведённых выше результатах была использована относительная, т.е. нормированная на средний суточный ход, квазиволновая возмущённость  $\delta$ wa (11). В то же время, поведение квазиволновой возмущённости в течение суток может представлять интерес для геофизического анализа процессов в ионосфере. Поэтому проанализируем распределения значений квазиволновой возмущённости (10) по внутрисуточному времени и соответствующие средние (с двухчасовым шагом) суточного хода для обоих приёмных пунктов за рассматриваемые периоды (первые три месяца 2002 и 2013 годов, рис. 13). В обоих случаях можно отчётливо увидеть два сопоставимых по величине максимума суточного хода квазиволновой возмущённости — дневной (10–15 LT) и ночной (00–04 LT). Отметим, что квазиволновая возмущённость, полученная описанным выше методом, очевидным образом проявляет наибольшую чувствительной компонентой вариаций TEC, что справедливо для дневных возмущений, вызванных акустико-гравитационными волнами, распространяющимися в направлении экватора. Вместе с тем отметим, что и ночные перемецающиеся ионосферные возмущения, вызванные, скорее всего, электродинамическими неустой-

чивостями и имеющие, помимо широтной, значительную долготную компоненту скорости, также хорошо выделяются предложенным в работе методом. В целом, наблюдаемая суточная изменчивость квазиволновой возмущённости хорошо согласуется с результатами, приведёнными в работах [26, 27]. Отметим, что рассмотренного в работе массива данных в целом явно недостаточно для определения источников и природы наблюдаемой квазиволновой возмущённости.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В задачах оценки ионосферных параметров на основе результатов одноточечного приёма спутниковых радиосигналов наиболее остро стоит проблема недостаточности данных. В случае использования фазовых данных приёма сигналов низкоорбитальных радиомаяков основная трудность заключается в необходимости оценки неизвестной аддитивной константы в выражении для STEC. Грубые приближения тонкого слоя и линейного широтного хода позволяют получить оценку этой константы, которую в ряде случаев можно уточнить из соображений неотрицательности VTEC. Результат использования такой оценки даёт значения VTEC вдоль траектории спутника. На основе этих данных можно приближённо получить, во-первых, значение VTEC в точке расположения приёмника и, во-вторых, вариации широтного хода VTEC.

Ввиду очевидной грубости используемых приближений эффективность такой методики нуждается в экспериментальной проверке путём сравнения с независимыми источниками данных. В настоящей работе проведено сопоставление с данными ионозондовых измерений. Такое сопоставление связано с несколькими проблемами. Во-первых, необходимо сравнивать различные типы данных — VTEC и критическую частоту  $f_{0F_2}$ , которая является наиболее точным продуктом вертикального зондирования. Для перевода значений VTEC в значения критической частоты  $f_{0F_2}$  необходимы дополнительные количественные предположения о связи между ними, выраженные в параметре эффективной толщины ионосферы. Во-вторых, работа ионозонда нестабильна в возмущённых условиях: увеличение поглощения ведёт к потере приёма отражённого сигнала, а большая горизонтальная неоднородность ионосферы — к значительному отклонению лучевых траекторий от вертикали. В связи с этим в условиях сильной возмущённости ионосферы данные ионозондов, как правило, отсутствуют или нерелевантны. В-третьих, алгоритмы автоматической обработки ионограмм, на основе которых формируются базы ионозондовых данных, не всегда работают корректно и могут вносить дополнительные искажения (например, на рис. 76 отчётливо видны горизонтальные полосы, свидетельствующие о том, что значительная доля эмпирических значений критических частот  $f_{0F_2}$  при цифровой обработке ионограмм заменена некоторыми предзаданными величинами). В ситуации, когда, в силу названных причин, как построенные оценки  $f_{0F_2}$ , так и данные ионозондов содержат погрешности, полученные высокие значения корреляций между ними (около 0,85) свидетельствуют о том, что существенного рассогласования между ними нет. Даже приняв простейшую модель связи VTEC и  $f_{0F_2}$  и задав характерную толщину и высоту ионосферного слоя константами, мы получили высокую коррелированность результатов при среднеквадратичных отклонениях порядка 1÷2 МГц. Разумеется, среднеквадратичное отклонение можно дополнительно минимизировать, перейдя от исходной оценки к использованию регрессионной модели, но в данной работе такая задача не ставилась.

Отметим также, что сопоставление оценок ионосферных параметров по данным одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных радиомаяков и по данным ионозондов можно провести не только в терминах критической частоты  $f_{0F_2}$ , но и непосредственно в терминах VTEC. При этом VTEC по данным ионозонда может быть оценён на основе метода, изложенного в работе [28], использующего аппроксимацию профиля электронной концентрации выше максимума слоя  $F_2$  на основе его поведения ниже максимума. Результаты такого сравнения на рассмотренных данных

не дают существенного улучшения коэффициентов корреляции между данными ионозондов и одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных радиомаяков. Это говорит о том, что основным источником ошибок в предложенном методе является не используемая модель высотного распределения электронной концентрации, а достаточно простая модель широтного распределения VTEC в тонком слое. В дальнейшем эта модель может быть улучшена, например с использованием дополнительных параметров, как это сделано в работе [4].

Обратим внимание на то, что в период супербури в конце октября 2003 года не работали ионозонды ни в Москве, ни в Гаконе, в то время как спутниковый приём продолжал давать информацию. Таким образом, предложенная методика оценки значений VTEC и  $f_{0F_2}$  по данным одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных радиомаяков может быть использована в те периоды, когда данные ионозондов недоступны.

Получаемые в рамках предложенной модели значения VTEC вдоль траектории спутника могут быть использованы для оценки квазиволновой возмущённости ионосферы, которая может быть рассмотрена как индикатор влияния на ионосферу внешних воздействий. Относительная квазиволновая возмущённость  $\delta$  wa статистически значимо коррелирует со значениями геомагнитных индексов  $K_p$  и  $D_{st}$  в условиях средней геомагнитной возмущённости (коэффициент корреляции 0,2÷0,5). Для сильной геомагнитной возмущённости (супербуря в конце октября 2003 года) корреляция возрастает до 0,6÷0,7. Таким образом, построенный на базе оценки VTEC параметр может быть индикатором степени возмущённости ионосферы, чувствительным к геомагнитной возмущённости.

Итак, предлагаемая методика использования одноточечного приёма сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков, несмотря на приближенный характер используемых базовых допущений, позволяет, с одной стороны, успешно оценивать такие ионосферные параметры, как VTEC и  $f_{0F_2}$  вблизи точки приёма и, с другой стороны, создавать эффективные индикаторы степени возмущённости ионосферы (квазиволновая возмущённость), которые проявляют высокую чувствительность к фактору геомагнитной возмущённости.

Авторы выражают благодарность NWRA (North-West Research Associates) за предоставленные данные измерений приёмника GKN, Lowell GIRO Data Center за данные ионозондов (http://spase.info/SMWG/Observatory/GIRO), а также World Data Centre for Geomagnetism, Kyoto и NOAA's National Centers for Environmental Information. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 17–77–20087), часть работ, связанная с предобработкой низкоорбитальных данных, выполнена при поддержке РФФИ (проект 19–05–00941).

Авторы хотели бы посвятить эту статью памяти своего коллеги, учителя и друга И.А. Нестерова, скоропостижно скончавшегося незадолго до завершения данной работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М. : Физматлит, 2007. 336 с.
- 2. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
- Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2013. V.3. Art. no. A27. https://doi.org/10.1051/swsc/2013049
- Ясюкевич Ю. В., Мыльникова А. А., Куницын В. Е., Падохин А. М. // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 6. С. 790–796. https://doi.org/10.7868/S0016794015060176

- Pi X., Mannucci A. J., Lindqwister U. J., Ho C. M. // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24, No. 18. P. 2283–2286. https://doi.org/10.1029/97GL02273
- Juan J., Sanz J., Rovira-Garcia A., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8. Art. no. A14. https://doi.org/10.1051/swsc/2017044
- Wilken V., Kriegel M., Jakowski N., Berdermann J. // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8. Art. no. A19. https://doi.org/10.1051/swsc/2018008
- Voeykov S., Yasyukevich A., Edemskiy I., et al. // Results in Physics. 2018. V. 11. P. 1056–1057. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.11.023
- Kunitsyn V., Kurbatov G., Yasyukevich Y., Padokhin A. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett. 2015. V. 12, No. 3. P. 547–551. https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2350037
- Savastano G., Komjathy A., Shume E., et al. // Remote Sensing. 2019. V. 11, No. 14. Art. no. 1734. https://doi.org/10.3390/rs11141734
- Padokhin A. M., Tereshin N. A., Yasyukevich Yu. V., et al. // Adv. Space Res. 2019. V. 63, No. 1. P. 257–269. https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.08.001
- Huang F., Lei J., Dou X. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122, No. 6. P. 6552–6561. https://doi.org/10.1002/2017JA023881
- Nesterov I. A., Andreeva E. S., Padokhin A. M., et al. // GPS Solutions. 2017. V. 21, No. 4. P. 1679– 1694. https://doi.org/10.1007/s10291-017-0646-1
- Stanislawska I., Gulyaeva T. L. // Satellite Positioning–Methods, Models and Applications / ed. by S. Jin. Croatia. Rijeka : InTech, 2015. P. 131–148. https://doi.org/10.5772/59902
- Gulyaeva T. L., Arikan F., Hernandez-Pajares M., Stanislawska I. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 329–340. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.06.011
- Cherniak I., Krankowski A., Zakharenkova I. // GPS Solutions. 2018. V. 22, No. 3. Art. no. 69. https://doi.org/10.1007/s10291-018-0730-1
- Yasyukevich Y. V., Kiselev A. V., Zhivetiev I. V., et al. // GPS Solutions. 2020. V. 24, No. 2. Art. no. 69. https://doi.org/10.1007/s10291-020-00983-2
- 18. Su M., Su X., Zhao Q., Liu J. // Sensors. 2019. V. 19, No. 1. Art. no 198. https://doi.org/10.3390/s19010198
- Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Razinkov O. G., Tereschhenko E. D. // Int. J. Imaging Systems Technology 1994. V. 5, No. 2. P. 128–140. https://doi.org/10.1002/ima.1850050209
- 20. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С., Нестеров И. А. // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 548–553. https://doi.org/10.3367/UFNr.0180.201005k.0548
- Maltseva O., Mozhaeva N. // Empirical Modeling and Its Applications / ed. by M. Habib. InTech, 2016. https://doi.org/10.5772/62837
- 22. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. // Space Weather. 2017. V. 15, No. 2. P. 418–429. https://doi.org/10.1002/2016SW001593
- Siefring C., Bernhardt P., James H., Parris R. // Space Sci. Rev. 2014. V. 189. P. 107–122. https://doi.org/10.1007/s11214-014-0110-2
- 24. James H. G., Frolov V. L., Andreeva E. S., et al. // Radio Sci. 2017. V. 52, No. 2. P. 259–270. https://doi.org/10.1002/2016RS006190
- 25. Reinisch B.W., Galkin I.A. // Earth, Planets, Space. 2011. V. 63, No. 4. P. 377–381. https://doi.org/10.5047/eps.2011.03.001
- Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Aragón-Ángel A. // Radio Sci. 2012. V. 47, No. 6. Art. no. RS0K05. https://doi.org/10.1029/2011RS004951
- Oinats A. V., Nishitani N., Ponomarenko P., et al. // Earths, Planets, Space. 2016. V. 68. Art. no. 8. https://doi.org/10.1186/s40623-016-0390-8

 Huang X., Reinisch B. W. // Radio Sci. 2001. V. 36, No. 2. P. 335–342. https://doi.org/10.1029/1999RS002409

Поступила в редакцию 26 апреля 2020 г.; принята в печать 7 октября 2020 г.

# LOCAL ESTIMATION OF IONOSPHERIC PARAMETERS FROM SINGLE STATION OBSERVATIONS OF LOW-ORBITAL BEACON SATELLITES

E. S. Andreeva, M. O. Nazarenko, I. A. Nesterov, A. M. Padokhin, N. A. Tereshin, and Yu. S. Tumanova

We propose a method for local estimation of ionospheric parameters (vertical total electron content and critical frequencies  $f_{0F_2}$ ) from single-station observations of low-orbital beacon satellites in the vicinity of the reception station. We demonstrate the capabilities of this technique using the data from two receiving stations located in Moscow (Russia) and Gakona (Alaska, USA). The critical frequencies  $f_{0F_2}$  calculated using the data from satellite signal receivers are compared with those based on the ionosondes in Moscow and Gakona. The correlation coefficients based on the ionosonde and satellite data processed by the proposed method are 0.85–0.86. A possibility for constructing local indicators of the ionospheric perturbation degree, which are sensitive to geomagnetic conditions, is discussed.