УДК 533.95+537.87

# КОРРЕЛИРОВАННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ СИНХРОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ГНСС И РАДИОСИГНАЛОВ ОНЧ ДИАПАЗОНА

© 2019 г. Б. Г. Гаврилов<sup>1,</sup> \*, Ю. И. Зецер<sup>1</sup>, А. Н. Ляхов<sup>1</sup>, Ю. В. Поклад<sup>1</sup>, И. А. Ряховский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер РАН, г. Москва, Россия \*boris.gavrilov34@gmail.com Поступила в редакцию 15.03.2018 г. После доработки 13.04.2018 г.

Принята к публикации 15.05.2018 г.

Пространственно-временное распределение среднеширотных возмущений верхней и нижней ионосферы в европейской зоне в период мощной геомагнитной бури и мощной рентгеновской вспышки исследовалось с использованием данных синхронных измерений параметров сигналов навигационных спутниковых систем и ОНЧ радиосигналов. Показано, что вклад электронной концентрации на разных высотах в величину полного электронного содержания ионосферы может существенно меняться в зависимости от вида гелиогеофизических возмущений. Согласованный анализ сигналов ГНСС и сигналов ОНЧ диапазона дает возможность исследования механизмов взаимосвязи возмущений верхней и нижней ионосферы и динамики возмущений ионосферы в горизонтальном и вертикальном направлениях.

DOI: 10.1134/S0023420619010035

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Статья посвящена результатам экспериментальных исследований возмущений верхней и нижней ионосферы, наблюдаемых одновременно в одной широтно-долготной зоне. Возмущения в верхней ионосфере выявляются с использованием данных по вариациям полного электронного содержания (ПЭС), а возмущения в нижней ионосфере — путем анализа вариаций амплитуды и фазы очень низкочастотных (ОНЧ) сигналов сверхдлинноволновых (СДВ) радиопередатчиков.

Определение величины ПЭС по данным двухчастотных измерений сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) широко применятся для исследования состояния и динамики ионосферы [1]. Значение ПЭС представляет собой интеграл электронной плотности в трубке с поперечным сечением 1 м<sup>2</sup> вдоль пути передачи радиосигнала от навигационного спутника к приемнику. При этом предполагается, что величина ПЭС характеризует главным образом состояние *F*-области, на высотах которой, по крайней мере, в спокойных гелиогеофизических условиях, наблюдается максимум электронной плотности.

Получение данных об изменении параметров нижней ионосферы сопряжено со значительными трудностями, так их исследование с использованием ионозондов и радаров невозможно, а космические аппараты на этих высотах не работают. Для контроля состояния нижней ионосферы часто используется анализ ОНЧ радиосигналов (3– 30 кГц), которые распространяются в волноводе, ограниченном земной поверхностью и *D*-областью ионосферы. Изменение параметров ОНЧ сигналов связано главным образом с состоянием верхней стенки волновода [2–4].

Несмотря на достоинства обоих методов, они применяются изолировано, что не позволяет использовать их результаты для анализа взаимосвязи возмущений верхней и нижней ионосферы. Механизмы этой взаимосвязи являются одной из проблем физики ионосферы, имеющей и важное практическое значение, так как состояние ионосферы в значительной степени определяет качество и устойчивость функционирования многочисленных радиотехнических систем (телекоммуникационных, навигационных, систем связи и управления, авиационных и аэрокосмических комплексов), обеспечивающих жизнедеятельность современного общества.

## 2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения синхронных данных по возмущениям верхней и нижней ионосферы выбран район, удобный для получения данных измерений как сигналов ГНСС, так и параметров ОНЧ радиосигналов. Выбор Европы обусловлен тем, что в геофизической обсерватории ИДГ РАН "Михнево" (МІК, 54.96° с.ш., 37.76° в.д.) ведется постоянный мониторинг амплитуд и фаз ОНЧ сигналов, принимаемых от СДВ радиостанций, расположенных в Европе, Азии и Северной Америке [5]. Для эксперимента



использованы данные измерений сигналов от передатчиков JXN (Gildeskål, Norway, 66.98° с.ш., 13.87° в.д.), GQD (Skelton, UK, 54.73° с.ш., 2.88° з.д.) и NAA (Cutler, USA, 44.63° с.ш., 67.28° з.д.).

Для сопоставления данных измерения фазовых и амплитудных характеристик сигналов СДВ-радиостанций, принятых в обсерваториях МІК и Kiel, с данными по вариациям полного электронного содержания ионосферы, из баз данных систем SOPAC (http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml) и MAD-RIGAL (http://www.openmadrigal.org/) выбраны измерительные пункты, расположенные вблизи СДВ трасс. Расположение измерительных пунктов, данные которых использованы в работе, показано на рис. 1. Приемники ГНСС обозначены звездочкой.

Возможности использования синхронного детектирования плазменных неоднородностей в верхней и нижней ионосфере по данным сигналов ГНСС и СДВ передатчиков демонстрируются на примере исследования ионосферных эффектов магнитной бури 17.III.2015 г. и солнечной рентгеновской вспышки 6.IX.2017 г. Выбор этих событий обусловлен тем, что механизмы генерации и эволюции ионосферных неоднородностей при магнитных бурях и рентгеновских вспышках сильно различаются, что должно проявляться в виде особенностей развития ионосферных эффектов.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Магнитная буря 17.III.2015 г. (St. Patrick's day geomagnetic storm). Сильнейшая геомагнитная буря нынешнего солнечного цикла исследовалась достаточно подробно, но опубликованные результаты исследований посвящены главным образом развитию

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 57 № 1 2019



возмущений верхней ионосферы [6, 7]. Полученные нами данные позволяют дополнить эти результаты обнаруженными эффектами в нижней ионосфере.

На верхней панели рис. 2 показаны результаты расчета вариаций ПЭС ионосферы по данным измерений GPS приемниками, расположенными в пунктах vis0 и mar6 в период 17-18 UT, соответствующий главной фазе бури. Наблюдались всплески ПЭС с амплитудой порядка 25 tecu (здесь и далее в статье используется общепринятая единица измерения ПЭС – количество электронов в столбе сечением1 м<sup>2</sup>: 1 tecu =  $10^{16}$  электронов/м<sup>2</sup>).

На нижней панели рис. 2 показаны вариации амплитуды СДВ сигналов на трассах JXN-MIK, GQD-MIK и NAA-MIK. Можно видеть, что времена появления наибольших возмущений ПЭС и амплитуды ОНЧ сигналов совпадают.

Определенным ограничением при использовании параметров ОНЧ сигналов для анализа возмушений нижней ионосферы является то, что изменение амплитуд и фаз сигналов является по существу интегральным эффектом, отнесенным ко всей длине трассы. Для локализации наблюдаемых эффектов дополнительно использованы данные по приему сигналов передатчика JXN в обсерватории Kiel (54.4° с.ш., 10.1° в.д.) (http://www.df3lp.de/) на трассе, пересекающей трассу NAA-MIK (рис. 1). Изменение амплитуды СДВ сигнала на трассе JXN-Kiel в интервал времени 17–18 UT 17.III.2015 г. (http://www.lf-radio.de/) показано на рис. 3. Изменение амплитуды сигнала зарегистрировано в тот же момент времени, что и на трассе NAA-MIK (рис. 2), что позволяет отнести наблюдаемое возмущение к исследуемому району.

Совпадение локализации возмущений нижней и верхней ионосферы качественно подтверждается не только рис. 2, но и построенной по данным сети навигационной сети Madrigal карты распределения отклонения возмущений ПЭС от медианного значения за прелылуший месяц (рис. 4).

Сеть Madrigal содержат значения ПЭС с шагом по времени 5 мин. Эти данные были усреднены 15-минутным окном и распределены по сетке 180° × 360° с шагом в один градус. Медианное значение ПЭС (ПЭС<sub>мед</sub>) было рассчитано за 27 предыдущих дней. Отклонение ПЭС от медианного значения ( $\Delta \Pi \Theta C$ ) рассчитывалась по формуле:

 $\Delta \Pi \Im C(\text{lat}, \text{long}, t) = (\Pi \Im C(\text{lat}, \text{long}, t) -$ (1) $-\Pi \Im C_{Men}$  (lat, long, *t*))/ $\Pi \Im C_{Men}$  (lat, long, *t*),

где lat — широта, long — долгота и t - UT.



КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 57 Nº 1 2019



С целью выявления возможного механизма ионизации нижней ионосферы во время бури 17.III.2015 г. были привлечены данные по измерению потоков заряженных частии аппаратурой спутника DMSP F19, орбита которого в 17 UT пересекла район наших измерений вдоль трассы JXN-Kiel (вертикальные пунктирные линии). По данным http://ssusi.jhuapl.edu/, измеренный детектором SSJ-5 спутника DMSP поток протонов достигал 4  $\cdot$  10<sup>11</sup> эВ/см<sup>2</sup> ср (рис. 5) с энергией до 32 кэВ, соответствующей верхнему пределу измерений датчика. Однако вид энергетического спектра потока протонов (рис. 6) показывает вероятность присутствия частиц более высоких энергий, способных вызывать ионизацию на высотах 60-80 км, соответствующих положению верхней стенке волновода Земля-ионосфера, в котором распространяются СДВ радиоволны [8]. Расчеты по модели [9] для спектров высыпающихся протонов, показанных на рис. 6, дали увеличение ПЭС на высотах до 140 км до 1.8 tecu.

**3.2.** Ионосферные эффекты солнечной рентгеновской вспышки 6.IX.2017 г. Солнечная вспышка 6.IX.2017 г. была выбрана как еще одно событие с экстремальной энергетикой, но существенно отличающимися от магнитной бури механизмами воздействия на ионосферу. Основным агентом возмущения в ионосфере является в этом случае всплеск рентгеновского и ультрафиолетового излучения (рис. 7а по данным http://ssusi.jhuapl.edu/). Максимум излучения в рентгеновской области спектра наблюдался около 12 UT, когда освещенная Солнцем область накрывала Атлантику и значительную часть Евразии и Америки.

Для анализа вариаций электронной плотности в верхней и нижней ионосфере использовались те же пункты измерения сигналов *GPS* и те же трассы СДВ сигналов, что и при анализе эффектов бури 17.III.2015 г. При этом все рассмотренные радиотрассы находились в освещенной вспышкой области.



Вариации вертикального ПЭС для GPS приемников, расположенных в пунктах vis0 и mar6, и вариации фазы и амплитуды СДВ сигналов показаны на рис. 76–7г. На обеих GPS станциях в момент вспышки наблюдается скачок ПЭС на величину ~2 tecu. То есть амплитуда изменения ПЭС оказалась примерно в 10 раз меньше, чем при буре 17.III.2015 г. (рис. 2).

Результат воздействия рентгеновского излучения вспышки на нижнюю ионосферу показан на рис. 7в и 7г, где приведены графики изменения амплитуды и фазы радиосигнала, принятого в обсерватории "Михнево" от трех СДВ радиостанций JXN,GQD и NAA 6.IX.2017 г. Трассы отреагировали на вспышку в 12 UT синхронным и близким по величине скачком фазы и амплитуды сигнала. Средний рост амплитуд сигналов на трех трассах составил ~3 дБ.

На рис. 8 показана карта отклонения возмущений ПЭС 6.IX.2017 г. от медианного значения за предыдущий месяц. Карта построена по данным навигационной сети Madrigal по методике, аналогичной использованной при построении рис. 4. Сравнение рис. 4 и 8 показывает, что максимальные значения ПЭС при вспышке в 5–6 раз меньше, чем в главной фазе мощной магнитной бури.

На рис. 9 представлены результаты расчета изменения электронного содержания в нижней ионосфере, выполненные по данным регистрации потока рентгеновского излучения спутником *GOES-15*. Профиль электронной концентрации в нижней ионосфере рассчитывался по общепринятой двухпараметрической модели [10]:

$$N_e(h) = 1.43 \cdot 10^{13} \exp((\beta - 0.15) \cdot (h - H)) \times \exp(-0.15H), \ [\text{m}^{-3}],$$
(2)

где H – характеристическая высота ионосферы,  $\beta$  – крутизна профиля концентрации электронов, h – текущая высота. Временная динамика

2019





параметров H и  $\beta$  определялась интенсивностью потока солнечного рентгеновского излучения  $W_s$ в канале 0.05–0.4 нм, измеренного на спутнике *GOES-15*. Как показано в [11] зависимость H и  $\beta$ от  $W_s$  имеет вид:

$$\beta[\kappa m^{-1}] = 0.047 \times \lg(W_s) + 0.58,$$
  

$$H'[\kappa m] = -4.5 \times \lg(W_s) + 47.$$
(3)

Расчеты, выполненные с использованием выражений (2) и (3), показали, что рост электронного содержания в нижней ионосфере (до 100 км) во время солнечной вспышки 6.IX.2017 г. достиг  $\Delta \Pi \Theta C = 2.5$  tecu.

## 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование эффектов различных гелиогеофизических явлений в верхней и нижней ионосфере в одной широтно-долготной зоне и использование одинакового набора источников данных позволяют корректно провести их сравнительный анализ.

В главной фазе геомагнитной бури 17.III.2015 г. по региону в целом отклонение возмущений ПЭС от медианного значения (рис. 4) достигла 40 tecu. По данным измерений приемниками ГНСС, расположенными в пунктах vis0 и mar6, наблюдались всплески ПЭС до 25 tecu (рис. 2).

Во время солнечной вспышки 6.IX.2017 г. по данным *GPS* приемников vis0 и mar6 (рис. 76) в момент вспышки наблюдается скачок ПЭС на величину ~2 tecu. То есть амплитуда изменения ПЭС во время рентгеновской вспышки оказалась примерно в 10 раз меньше, чем при буре 17.III.2015 г. (рис. 2). Эти данные показывают интегральное значение полного электронного содержания в трубке, пересекающей атмосферу и ионосферу до высот порядка 20000 км, но не несут информации о распределении электронной концентрации по высоте. Для оценки вклада нижней ионосферы в общее значение ПЭС проанализированы данные по возмущениям параметров СДВ сигналов, распространяющихся в волноводе Земля—нижняя ионосфера.

Эффекты в нижней ионосфере, вызванные мощной магнитной бурей и мощной рентгеновской вспышкой оказались близки. Рост амплитуд сигналов составил единицы дБ, а рост ПЭС в нижней ионосфере составил 1.8–2.5 tecu.

Таким образом, вклад нижней ионосферы в значение ПЭС во время магнитной бури 17.III.2015 г. составлял порядка 10%, что в целом соответствует существующим представлениям о распределении электронной концентрации в ионосфере, а при солнечной вспышке 6.III.2017 г. рост ПЭС в нижней ионосфере оказался сопоставим с общим ростом ПЭС, оцениваемым по данным приемников ГНСС.

Использование результатов расчета и карт распределения ПЭС, полученных по данным сигналов ГНСС, должно проводиться с учетом различных действующих механизмов воздействия на ионосферу при разных видах гелиогеофизических событий. Так сравнение карт распределения ПЭС при мощной геомагнитной буре и солнечной вспышке (рис. 4 и 8) показывает разницу в величине эффекта воздействия, но не дают информации о том, что во втором случае общий рост полного электронного содержания мог в значи-



тельной степени определяться ростом электронной концентрации в нижней ионосфере.

## выводы

Полученные в работе результаты показывает, что величина полного электронного содержания ионосферы, определяемого по данным ГНСС, не всегда определяется значением электронной концентрации в *F*-области ионосферы.

Эффективным инструментом для изучения взаимосвязанных процессов в верхней и нижней ионосфере является координированный анализ вариаций сигналов ГНСС и сигналов СДВ радиостанций. Полученные в работе результаты демонстрируют не только временную и пространственную связь возмущений в ионосфере, представляющей собой единую систему плазмохимических, конвективных, электродинамических процессов, но и позволяют оценить вклад различных высот в ионосферную динамику.

При анализе и использование данных по ПЭС необходимо принимать во внимание особенности распределения электронной концентрации по высоте в зависимости от вида гелиогеофизического события, действующих механизмов и агентов возмущений геофизической среды.

Работа выполнена при поддержке Государственных заданий № АААА-А17-117112350014-8 и 0146-2015-0017.

Авторы выражают искреннюю благодарность за данные, предоставленные международными банками геофизических данных *Madrigal* (http://www. openmadrigal.org/), *UK Solar Datacenter* (https://www. ukssdc.ac.uk/cgi-bin/digisondes/cost\_database.pl), *Kiel Longwave Monitor* (http://www.lf-radio.de/) и *Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory* за данные спутника *DMSP* (http://ssusi.jhuapl.edu/).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Afraimovich E.L., Boitman O.N., Zhovty E.I. et al.* Dynamics and anisotropy of traveling ionospheric disturbances as deduced from transionospheric sounding

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ том 57 № 1

data // Radio Sci. 1999. V. 34. № 2. P. 477–487. doi 10.1029/1998RS900004

- Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Ряховский И.А., и др. Удаленная регистрация КНЧ/ОНЧ излучения, вызванного экспериментами по искусственной модификации ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 4. С. 466-472. doi 10.7868/S0016794015040045
- Han F., Cummer S.A., Li J., Lu G. Daytime ionospheric D region sharpness derived from VLF radio atmospherics // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. № 5. doi 10.1029/ 2010JA016299
- 4. *Maurya A.K., Veenadhari B., Singh R. et al.* Nighttime D region electron density measurements from ELF-VLF tweek radio atmospherics recorded at low latitudes // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A11. doi 10.1029/ 2012JA017876
- 5. Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Ляхов А.Н. и др. Пространственно-временные распределения электронной плотности в ионосфере по данным регистрации полного электронного содержания и фазы ОНЧ-радиосигналов // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 4. С. 500–509. doi 10.7868/ S001679401704006X
- 6. Astafyeva E., Zakharenkova I., Förste M. Ionospheric responseto the 2015 St. Patrick's Day storm: Aglobal multi-instrumental overview // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. № 10. P. 9023–9037. doi 10.1002/2015JA021629
- Borries C., Mahrous A.M., Ellahouny N.M., Badeke R. Multiple ionospheric perturbations during the Saint Patrick's Day storm 2015 in the European-African sector // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121. № 11. P. 11333–11345. doi 10.1002/2016JA023178
- 8. *Fang X., Lummerzheim D., Jackman C.H.* Proton impact ionization and a fast calculation method // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. № 8. P. 5369–5378. doi 10.1002/jgra.50484
- 9. Смирнова Н.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. и др. Роль высыпающихся протонов в ионизации полярной ионосферы // Космич. исслед. 2004. Т. 42. № 3. С. 219–227. (Cosmic Research. P. 210.)
- Wait J.R., Spies K.P. Characteristics of the earth-ionospherewaveguide for VLF radio waves. NBS Technical Note 300. 1964.
- 11. *Kumar A., Kumar S.* Solar flare effects on D-region ionosphere using VLF measurements during low- and high-solar activity phases of solar cycle 24 // Earth, Planets and Space. 2018. V. 70. № 1. P. 29. 70: 29. doi 10.1186/s40623-018-0794-8

2019