

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.510.535, 550.388.2

**ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ
ОКТАБРЯ 2003 ГОДА В ИОНОСФЕРЕ НАД ЗАПАДНОЙ ЕВРОПОЙ
ПО ДАННЫМ GNSS-ТОМОГРАФИИ И ИОНОЗОНДОВЫХ
ИЗМЕРЕНИЙ****В. Е. Куницын, М. А. Кожарин, И. А. Нестеров, М. О. Козлова***(кафедра физики атмосферы)*

E-mail: kunitsyn@phys.msu.su

Рассмотрены некоторые особенности структуры ионосферы над Западной Европой, наблюдавшиеся в период сильных гелиогеофизических возмущений осенью 2003 г. По результатам четырехмерной томографической реконструкции данных высокоорбитальных спутников в ночной ионосфере 30/31 октября 2003 г. выявлена область повышенной ионизации. Прослежено движение пятна вдоль геомагнитной широты. Проведено сопоставление радиотомографических результатов с данными ряда ионозондов.

Гелиогеофизические возмущения осени 2003 г. являются одними из наиболее сильных за весь период солнечно-магнитосферно-ионосферных наблюдений. Их исследованию уделяется большое внимание. Восстановлена подробная хронология событий, выявлены некоторые особенности структуры и динамики межпланетных и земных физических полей. Установлено, что в период с 18 октября до второй декады ноября 2003 г. на Солнце существовало несколько активных областей. Эволюционируя, эти области увеличивались в своих размерах, достигая 0.0025 площади солнечной поверхности. В этих областях произошла серия вспышек, всплесков радиоизлучения и выбросов солнечного вещества. Следует особо выделить вспышки 28 и 29 октября, сопровождавшиеся мощными радиовсплесками и быстрым выбросом солнечного вещества со скоростью порядка 2000 км/с и более [1]. Следствием экстремально высокой активности на Солнце явилась высокая магнитная активность: трижды 29–30 октября регистрировался максимально возможный индекс $K_p = 9$.

Экстремальные солнечно-магнитосферные бури конца октября 2003 г. сопровождались рядом редких, порой уникальных геофизических феноменов: крупномасштабными вариациями полного электронного содержания (total electron content — ТЕС), смещением экваториальной аномалии к полюсу до 50° магнитной широты, появлением «языков ионизации» — фрагментов низкоширотной плазмы, занесенных конвекцией на ночную сторону ионосферы через область дневного каспа и полярную шапку и располагающихся вдоль ночной стороны аврорального овала. Значение ТЕС в F-области ионосферы в пределах полярного языка ионизации, по некоторым данным, составляло до 300 ТЕСУ (единицы ТЕС) [2]. F-слой ионосферы в полосе примерно 15° от экватора неоднократно поднимался до высоты

800 км [3]. Наблюдались большие значения электрических полей и продольных токов.

В настоящей статье рассматривается одно из проявлений бури конца октября 2003 г. в ионосфере над Западной Европой. Информация о структуре ионосферной плазмы на протяжении указанного периода была получена путем четырехмерной томографической реконструкции данных GNSS (Global Navigation Satellite Systems) [4, 5] на сети приемников в Западной Европе ($[-10^\circ, 45^\circ]$ по долготе, $[30^\circ, 80^\circ]$ по широте). Глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS) включают высокоорбитальные навигационные системы с использованием зарубежных спутников GPS и российских спутников ГЛОНАСС. Для периода 28–31 октября 2003 г. был рассчитан временной ход электронной концентрации и ТЕС в ионосфере над Западной Европой. Расчет проводился с часовой дискретизацией по времени и линейной интерполяцией в промежутках. На реконструкциях ясно виден суточный и широтный ход электронной концентрации, заметно наличие ионосферного провала в вечернее и ночное время. Кроме того, обнаружены и специфические аномалии. Для иллюстрации результатов четырехмерной реконструкции на рис. 1 и 2 приведены результаты расчета вертикального ТЕС во время сильных возмущений в 00:00 UT и 01:00 UT 31 октября 2003 г. Видно, что над исследуемым регионом располагалось пятно высокой ионизации, что нехарактерно для ночных условий слабозамушенной ионосферы. Размеры пятна (по половине уровня вертикального ТЕС) составляли 1500–2000 км в направлении север–юг и 2500–3000 км в направлении запад–восток. Отметим, что полученные значения электронной концентрации и вертикального ТЕС в районе ночного пятна превышают типичные дневные значения. Максимум пятна в 00:00 UT находился примерно над централь-

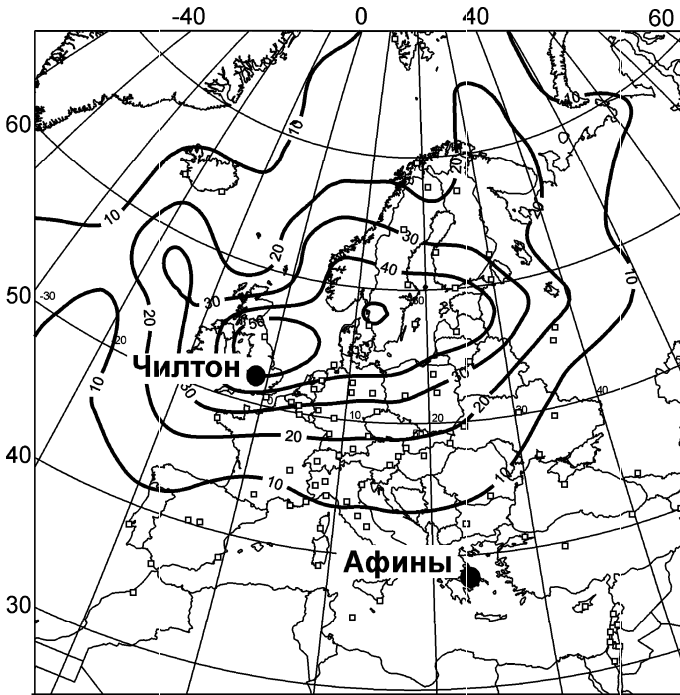


Рис. 1. Изолинии вертикального ТЕС над европейским регионом в 00:00 UT 31 октября 2003 г.

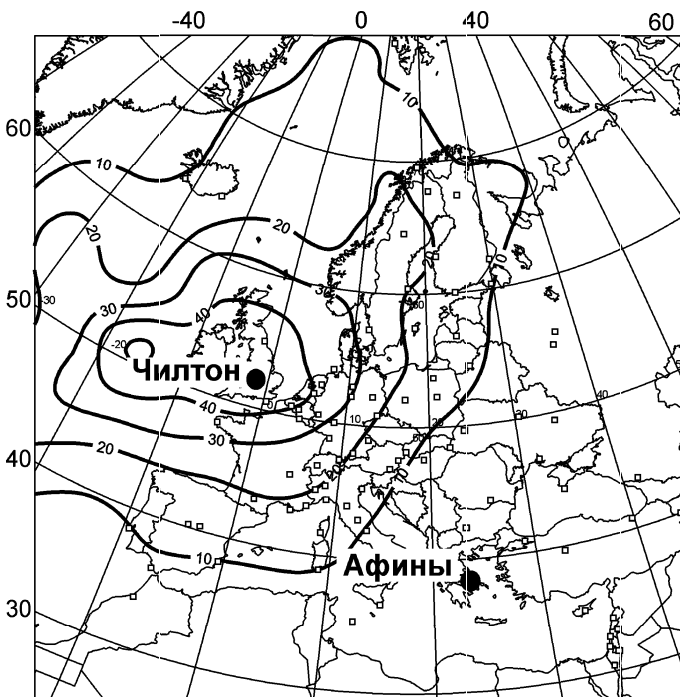


Рис. 2. Изолинии вертикального ТЕС над европейским регионом в 01:00 UT 31 октября 2003 г.

ной частью восточного побережья Великобритании; спустя час центр пятна сместился к западу. По данным серии последовательных томографических реконструкций, прослеживается движение пятна с востока на запад приблизительно вдоль геомагнитной широты в вечерние часы 30 октября и ночные часы 31 октября. Время движения этой структуры в исследуемой области составляет порядка 4–5 ч. Скорость движения пятна примерно соответствует скорости вращения Земли. Иными словами, пятно

высокой ионизации находится с ночной стороны Земли и слабо меняется по мере вращения Земли в течение как минимум 4–5 ч.

Для интервала 28–31 октября 2003 г. проведено сопоставление данных ряда европейских ионозондов о критических частотах слоя F2 (f_0F_2) со значениями, вычисленными по результатам томографии в пунктах расположения ионозондов. Анализ данных ионозондов показал, что на севере (Тромсе, Норвегия) и на юге Европы (Афины, Греция, Рим и Сан-Вито, Италия) суточный ход f_0F_2 в период 28–31 октября был близок к обычному для слабо-возмущенных условий, с дневным повышением и ночным понижением значений. На рис. 3 приведены графики изменений f_0F_2 30–31 октября 2003 г. по данным радиотомографии и ионозонда в Афинах. Видно, что ход обеих кривых практически идентичен. Однако над центральной частью Европы, где зафиксировано ночное пятно ионизации, поведение критической частоты иное: 29 и 30 октября отмечено существенное (до двух раз) понижение дневных значений f_0F_2 по сравнению с типичными величинами в спокойный период, а в вечерние и ночные часы 30/31 октября наблюдалось резкое повышение критической частоты, при этом производная достигала нескольких мегагерц за 15–20 мин. На рис. 4 показан график изменений f_0F_2 30–31 октября по данным ионозонда в Чилтоне. Повышение критической частоты ионосферы около 00:00 UT 31 октября до дневных значений, зафиксированное по данным ионозонда и радиотомографии, соответствует прохождению пятна повышенной ионизации над Великобританией. О снижении дневных значений f_0F_2 во время возмущений и наличии в субавроральной и среднеширотной ионосфере областей повышенной концентрации в ночные часы упоминались в литературе и ранее [6, 7], однако детальных сведений о пространственно-временной структуре этих феноменов до настоящего времени не было.

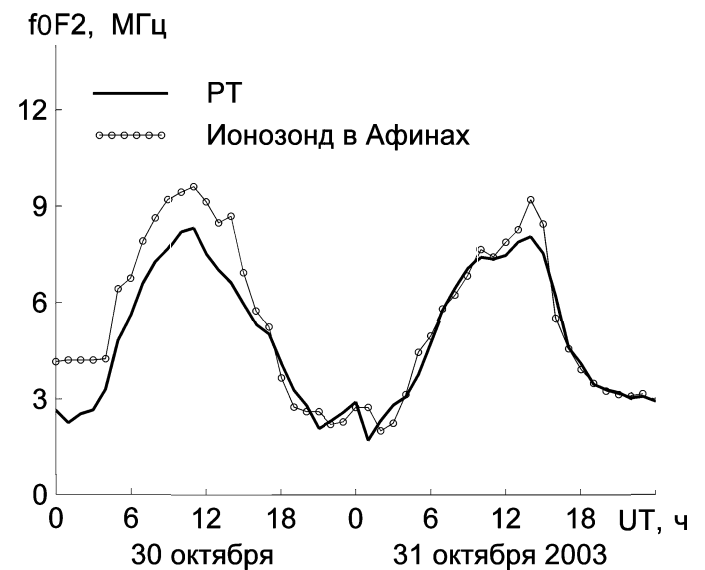


Рис. 3. График изменения f_0F_2 30–31 октября 2003 г. по данным РТ и ионозонда в Афинах

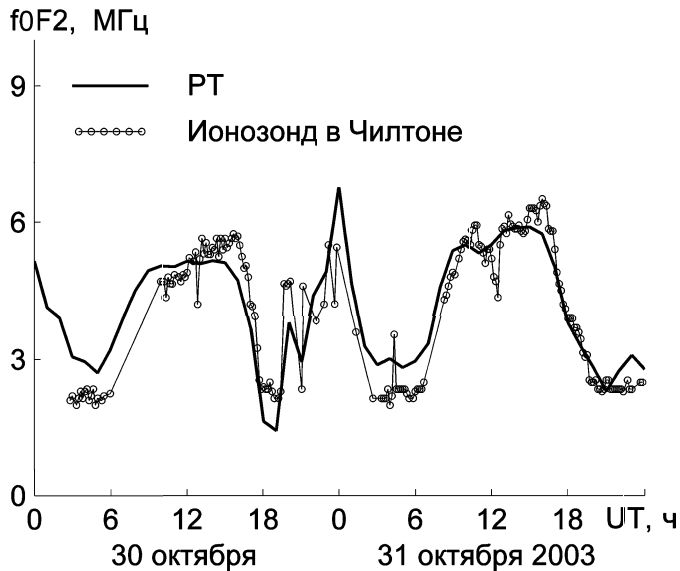


Рис. 4. График изменения f_0F_2 30–31 октября 2003 г. по данным РТ и ионозонда в Чилтоне

В результате проведенной работы была впервые получена четырехмерная томографическая реконструкция ионосферы и выявлены некоторые особенности поведения ионосферы в период сильных гелиогеофизических возмущений. По результатам реконструкции удалось проследить проявления характерных особенностей ионосферной структуры, таких, как, например, главный ионосферный провал и ночное пятно повышенной концентрации. Сопоставление результатов реконструкции с независи-

мыми измерениями ионозондов показало высокое качество и эффективность разработанных подходов и алгоритмов четырехмерного томографического восстановления по данным GPS.

Работа проведена при поддержке РФФИ (гранты 02-05-65350, 04-05-64671). Авторы выражают благодарность сотрудникам Lowell Center for Atmospheric Research, University of Massachusetts, USA за предоставленную возможность пользования базой данных DIDB и программное обеспечение.

Литература

1. http://kosmofizika.ru/buri/ki_0503.htm.
2. Foster J.C., Coster A.J., Rideout B. et al. // *Eos Trans.* 2004. **85**, N 17. P. SH44A-06.
3. Huang C.Y., Burke W.J., Holeman E. // *Eos Trans.* 2004. **85**, N 17. P. SH53A-14.
4. Kunitsyn V., Kozharin M., Nesterov I. // *Proc. Special Symposium of the URSI Joint Working Group FG. 13–15 October 2003. Matera, Italy.* P. 58.
5. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. *Ionospheric Tomography.* Berlin, 2003.
6. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы.* М., 1988.
7. Tsagouri I., Belehaki A. // *Ann. Geophys.* 2002. **20**, N 8. P. 1225.

Поступила в редакцию
01.06.04