

УДК 533.9

ОБНАРУЖЕНИЕ НАЗЕМНЫМИ МЕТОДАМИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНОГО СВЕРХДЛИННОВОЛНОВОГО ПЕРЕДАТЧИКА

Д. С. Котик, Ф. И. Выборнов, А. В. Рябов, А. В. Першин, В. А. Яшнов*

Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, Россия

В работе представлены результаты экспериментов по детектированию искусственных неоднородностей в ионосферной плазме, созданных излучением мощной сверхдлинноволновой (СДВ) радиостанции. Для диагностики ионосферных неоднородностей анализировались вариации полного электронного содержания и данные ионозонда. Для выбора спутников глобальных навигационных систем NAVSTAR и GPS, сигнал от которых проходит через возмущённую область, проводился расчёт пространственного распределения амплитуды электрического поля СДВ передатчика. Характер вариаций полного электронного содержания во время работы СДВ станции существенно отличался от контрольного измерения, когда наземный передатчик был выключен. По данным ионозонда, работа СДВ передатчика приводила к F -рассеянию (этот эффект имел место в ночное время). Проведённый эксперимент впервые показал, что с помощью наземных измерений полного электронного содержания возможно исследование области турбулентности во внешней ионосфере, индуцированной работой СДВ радиостанции.

ВВЕДЕНИЕ

Проведённые ранее на спутнике DEMETER измерения показали, что на высоте около 700 км над работающими сверхдлинноволновыми (СДВ) передатчиками регистрируются сильные флуктуации ряда параметров ионосферной плазмы [1]. Область наблюдаемого эффекта составляла примерно 400÷500 км по горизонтали и была смещена в направлении магнитного зенита. Во время пролёта спутника через центр возмущённой области над мощным СДВ радиопередатчиком, расположенным вблизи г. Нижний Новгород, на борту спутника были зафиксированы вариации электронной концентрации и квазистатического электрического поля с частотой в интервале 0÷1 кГц [2]. Работа [2] была направлена на исследование ионосферной турбулентности, индуцированной стендом «Сура», область которой составляет примерно 50 км на высоте F -слоя. Эффект СДВ станции в этом эксперименте был обнаружен попутно. Метод измерения полного электронного содержания в исследованиях модификации F -слоя мощным коротковолновым излучением применяется достаточно давно и успешно [3]. Нам представилось интересным применить этот же метод наземных измерений для изучения турбулентности во внешней ионосфере над СДВ радиостанцией. С этой целью в сентябре 2014 года была проведена серия экспериментов по регистрации вариаций сигналов GPS в периоды работы мощного СДВ передатчика.

1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования возмущений в ионосфере использовались приёмник GPS и ионозонд CADI, которые располагались в 130 км к западу от мощной СДВ радиостанции, находящейся вблизи г. Нижний Новгород [4] (см. рис. 1). Проводилась регистрация сигналов GPS с интервалом

* alexr@nirfi.unn.ru



Рис. 1. География эксперимента: СДВ приёмник ($56,32^\circ$ с. ш., $44,02^\circ$ в. д.), СДВ передатчик ($56,17^\circ$ с. ш., $43,93^\circ$ в. д. [3]), ионозонд и GPS-приёмник ($56,14^\circ$ с. ш., $46,08^\circ$ в. д.)

1 с и ионограмм вертикального зондирования с интервалом 15 мин. Полное электронное содержание (ПЭС) определялось методом двухчастотного радиопросвечивания ионосферы сигналами GPS [5]. При распространении таких сигналов через возмущённую область появляется набег фазы, который линейно связан с ПЭС на траектории распространения [5]. Измерения, на основании которых рассчитывалось ПЭС, проводились с помощью специализированного приёмника Prego-T. С использованием цифрового приёмника сигналов, который располагался в 18 км к северу от передатчика, в круглосуточном режиме осуществлялся мониторинг работы СДВ радиостанции на частотах 15 ± 20 кГц.

Для интерпретации результатов измерений были проведены расчёты распределения напряжённости электрического поля СДВ передатчика в ионосфере. Вычисления были выполнены в рамках лучевого подхода [6, 7]. Высотное распределение параметров ионосферы для условий эксперимента получено на основе модели ионосферы IRI-2012. На рис. 2 показано распределение амплитуды электрического поля на частоте 15 кГц на высоте 500 км над поверхностью Земли для передатчика, расположенного в точке с координатами $x = 0$, $y = 0$ (высота 500 км была выбрана для определённости).

Радиоволны от СДВ передатчика во внешней ионосфере распространяются практически вдоль силовых линий магнитного поля, расходимостью которого до высот порядка 1000 км можно пренебречь. На любых высотах во внешней ионосфере, на которых проводились спутниковые измерения, распределение амплитуды СДВ сигнала будет подобно показанному на рис. 2. Пространственное распределение амплитуды электрического поля определяется диаграммой направленности передающей антенны и особенностями распространения очень низкочастотных (ОНЧ) сигналов в ионосферной плазме. Результаты расчётов показали, что перенос энергии излучения СДВ передатчика происходит, в основном, вдоль линий напряжённости геомагнитного поля.

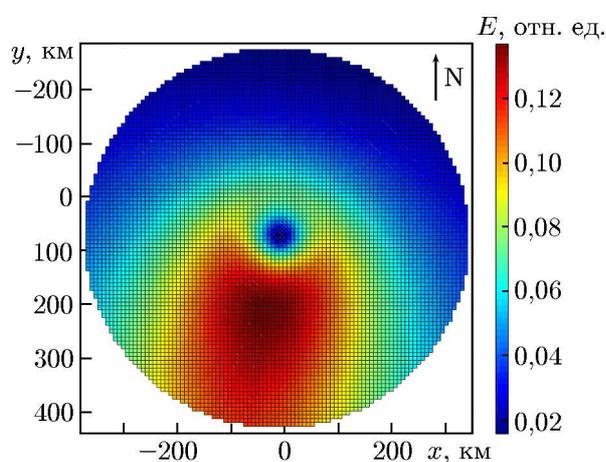


Рис. 2. Распределение амплитуды электрического поля E на высоте 500 км над поверхностью Земли

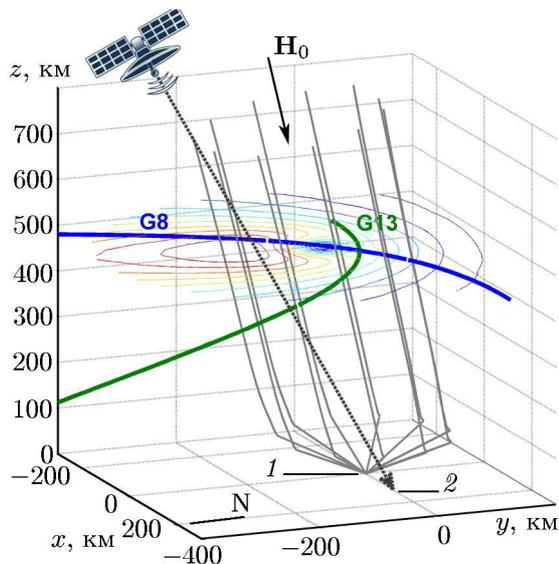


Рис. 3. Геометрия эксперимента (цифрой 1 отмечен СДВ передатчик, цифрой 2 — GPS-приёмник). Лучевые траектории для частоты 15 кГц идут практически вдоль силовых линий

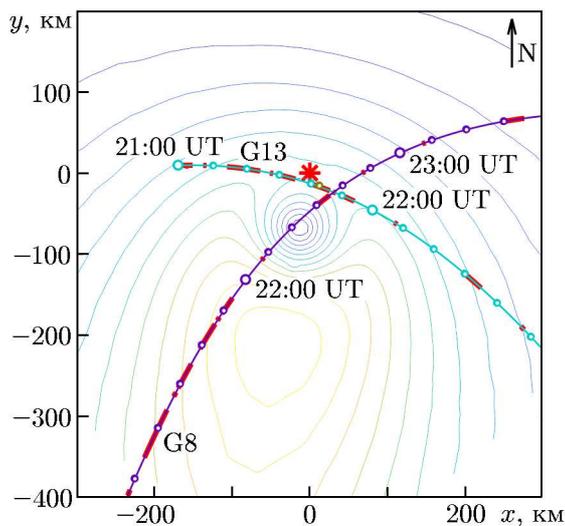


Рис. 4. Проекция на Землю линий пересечения ионосферы на высоте 500 км радиолучами спутников G8 и G13 системы GPS для 21 сентября 2014 года. Утолщением траектории отмечены интервалы работы СДВ передатчика

Необходимо отметить, что время пролёта спутника через возмущённую область составляет около трёх часов, что сравнимо с периодами основных вариаций ПЭС. В этих условиях частотный анализ вариаций ПЭС методом быстрого преобразования Фурье неэффективен. Наиболее показательным оказался метод анализа сигналов с помощью вэйвлет-преобразования. Он позволяет исследовать каждый характерный масштаб вариаций с необходимой и достаточной для него разрешающей способностью. В результате обработки данных были построены так называемые скалограммы, которые отражают зависимость распределения энергии сигнала по частотам от времени.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для анализа было выбрано несколько дней со спокойной геомагнитной обстановкой в сентябре 2014 года. Сверхдлинноволновый передатчик работал интенсивно (50% и более времени наблюдения) 21 сентября (индекс *K* в этот день был на уровне 1). В этот же период времени наблюдалось прохождение нескольких спутников GPS в интересующей нас области в интервале времени между 21:00 и 24:00 UT.

Результаты расчётов распределения поля СДВ передатчика использовались для выбора спутников, радиолучи от которых приходили к приёмнику GPS сигналов через возмущённую область ионосферы. Лучи спутника G8 пересекали область воздействия южнее передатчика, а лучи спутника G13 — на периферии (см. рис. 3 и 4, проекции траекторий спутников G8 и G13 на высоту 500 км изображены линиями синего и зелёного цвета соответственно). На рис. 4 приведены проекции на Землю линий пересечения ионосферы на высоте 500 км радиолучами спутников G8 и G13 системы GPS для 21 сентября 2014 года. Звёздочкой отмечено месторасположение СДВ передатчика.

Сетка рисунка имеет шаг 100 км по горизонтали и вертикали. Изолинии соответствуют интенсивности СДВ поля с минимумом на юго-западе от передатчика на расстоянии около 70 км

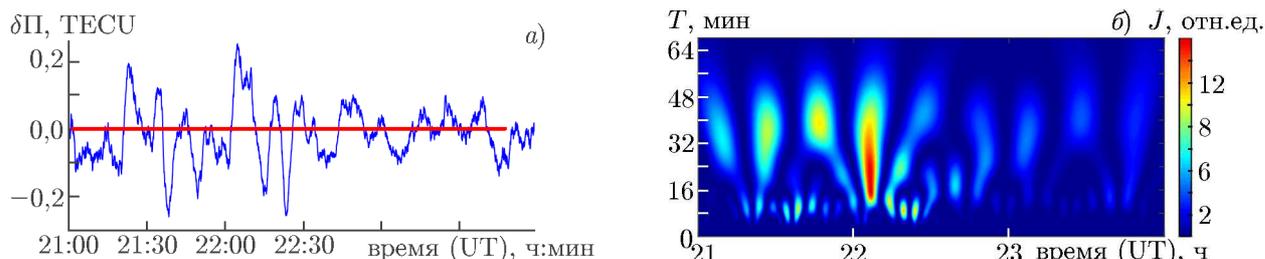


Рис. 5. Запись вариаций ПЭС ($\delta\P$, *a*) и их вейвлет-преобразование (*б*, T и J — период и интенсивность вариаций соответственно) для спутника G8, эксперимент 21 сентября 2014 года. Время работы СДВ передатчика отмечено горизонтальными линиями на панели *a*

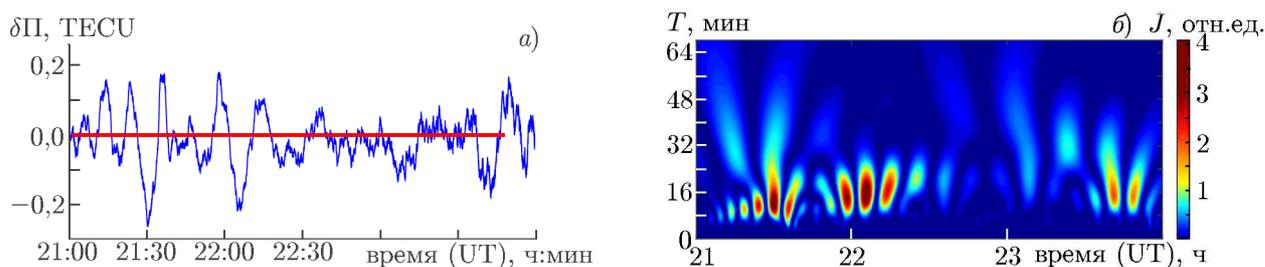


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для спутника G13, эксперимент 21 сентября 2014 года

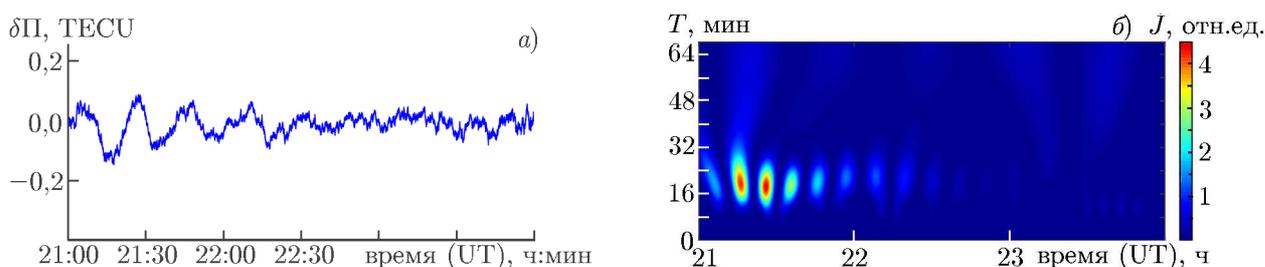


Рис. 7. То же, что на рис. 5, для спутника G8 при неработающем СДВ передатчике. Эксперимент 23 сентября 2014 года

и максимумом на расстоянии около 240 км в этом же направлении (в плоскости магнитного меридиана). Утолщения траекторий спутников соответствуют интервалам работы передатчика, кружками на траекториях отмечены часовые и десятиминутные метки времени.

Сравнение записей ПЭС ионосферы на различных трассах показало качественное различие их вариаций. Для спутника G8 вариации ПЭС были максимальны при прохождении области воздействия (см. рис. 5–7). В то же время для спутника G13 амплитуда вариаций была значительно меньше и увеличивалась по мере приближения спутника к зоне максимального воздействия.

Для записей вариаций ПЭС 21.09.2014 (см. рис. 5) характерно нарастание мелкомасштабных флуктуаций по мере приближения к центру расчётной области максимума интенсивности СДВ излучения. Этот эффект отсутствует в контрольной записи 23.09.2014 г. с 21:00 до 24:00 UT, когда СДВ передатчик не работал (см. рис. 7).

Поскольку эксперимент по наземной регистрации турбулентности во внешней ионосфере над работающим СДВ передатчиком ставился впервые, то основной целью была демонстрация принципиальной возможности подобного рода измерений. Поэтому на рис. 5–7 представлены только примеры обработки данных. Всего в период с 24 августа по 23 сентября 2014 года было зарегистрировано 7 сеансов, в которых наблюдался эффект повышения ПЭС и увеличение частоты его флуктуаций. Измерения при высокой геомагнитной активности из рассмотрения исключались.

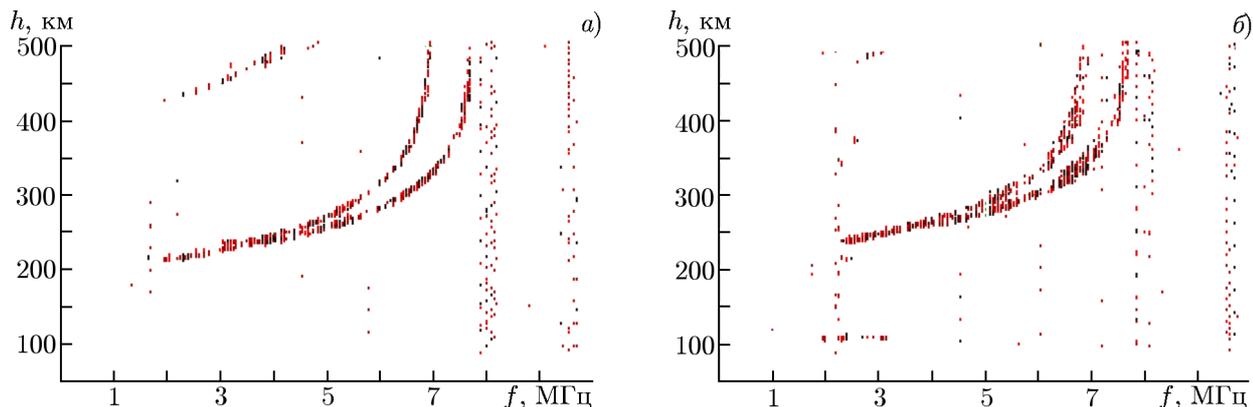


Рис. 8. Ионограммы зонда SADI 29.09.2014, 15:00 UT (а, соответствует началу работы СДВ передатчика) и 15:30 UT (б)

На рис. 8 приведены ионограммы, соответствующие началу работы СДВ передатчика и моменту времени через 30 мин, в течение которых передатчик продолжал работу. Из рис. 8б видно, что развилась диффузность, проявившаяся в уширении треков отражённых импульсов ионозонда.

Анализ ионограмм ионозонда SADI показал, что работа СДВ передатчика в сентябре 2014 года после 15:00 UT уже в течение 30 мин приводила к появлению F -рассеяния в ионосфере. Особенностью диффузности было то, что паузы в работе передатчика длительностью до 15 мин не влияли на степень F -рассеяния. Диффузность отражённого сигнала устойчиво наблюдалось во всех сеансах работы СДВ передатчика в ночное время.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты исследования показывают возможность диагностирования наземными методами искусственной ионосферной турбулентности, вызванной излучением мощного СДВ передатчика. Установлено, что наземные измерения вариаций ПЭС вблизи СДВ передатчика могут быть использованы для обнаружения турбулентности во внешней ионосфере, вызванной работой СДВ передатчика. Предлагаемый метод прост в использовании и не требует значительных затрат. Альтернативой данному методу могут служить только измерения на спутнике или с помощью некогерентного радара.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 14-12-00706).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parrot M., Sauvaud M. J., Berthelier J. J., Lebreton J. P. // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, No. 11. Art. no. L11111.
2. Rapoport V. O., Frolov V. L., Polyakov S. V., et al. // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, No. A10. Art. no. A10322.
3. Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J. // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, No. 22. Art. no. L22102.
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Goliath_transmitter
5. Рябов А. В., Грач С. М., Шиндин А. В., Котик Д. С. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2011. Т. 54, № 7. С. 485.

6. Kimura I. // Space Sci. Rev. 1985. V. 42, No. 3–4. P. 449.
7. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 306 с.

Поступила в редакцию 22 февраля 2018 г.; принята в печать 29 июня 2018 г.

GROUND-BASED DETECTION OF THE TURBULENCE INDUCED IN THE OUTER IONOSPHERE BY A HIGH-POWER VLF TRANSMITTER

D. S. Kotik, F. I. Vybornov, A. V. Ryabov, A. V. Pershin, and V. A. Yashnov

We present experimental results on the detection of artificial irregularities produced in the ionospheric plasma by a high-power VLF transmitter. The analysis of TEC variations and ionosonde data was used for the diagnostics of ionospheric turbulence. Spatial distribution of the electric field amplitude of the VLF transmitter was calculated for selection of the NAVSTAR and GPS satellites the signal from which passes through the perturbed region. A quite different TEC variation curve was observed in the check measurement when the transmitter was out of operation. Operation of the VLF transmitter resulted in the appearance of F spread in the ionosonde data (the effect took place at night). The experiment showed for the first time that with the help of ground-based measurements of TEC it is possible to study the region of turbulence in the outer ionosphere induced by the operation of a VLF radio station.