

## Ионосферные возмущения над Европой, стимулированные мощным атмосферным фронтом

Е. М. Занимонский, А. В. Зализовский, В. Н. Лисаченко, А. А. Сопин,  
Ю. М. Ямпольский

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: zanimonskiy@rian.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 22 апреля 2009 г.*

Изложены предварительные результаты исследования вариаций полного электронного содержания ионосферы над Центральной Европой, обусловленных тропосферными процессами в этом регионе в январе 2007 г. В работе использованы данные европейской сети перманентных станций глобальной навигационной спутниковой системы. Предложено использовать индекс возмущенности ионосферы, который позволяет проследивать ее реакцию на внешние воздействия.

### 1. Введение

В геокосмосе сегодня функционирует большое число спутниковых систем, обеспечивающих нашу цивилизацию услугами глобальной связи, телерадиовещания, навигации, судовождения, прогноза погоды, поиска полезных ископаемых, экологического мониторинга и др. Поэтому изучение околоземного космического пространства и прогнозирование космической погоды имеет большое практическое значение.

Космическая погода зависит в первую очередь от влияний “сверху” – радиационных и корпускулярных потоков энергии, распространяющихся от Солнца. Заметные возмущения плазменной оболочки Земли – ионосферы – порождаются также источниками энерговыделения на поверхности Земли и в тропосфере. К ним относятся землетрясения, взрывы, извержения вулканов, а также циклоническая активность. Эти явления генерируют внутренние атмосферные гравитационные волны (АГВ) [1, 2], которые рассматриваются как основной транспортный агент переноса возмущений из тропосферы в ионосферу [2-4].

В настоящее время концепция о влиянии возмущений нижней атмосферы на околоземное космическое пространство выглядит в целом сформированной и устоявшейся. Однако разнообразие приповерхностных источников возмущений и неоднозначность реакций на них характеристик ионосферной плазмы требуют проведения дальнейших исследований. В настоящей работе продолжено изучение влияния мощных метеорологических явлений в тропосфере на состояние ионосферы над Европейским континентом.

Ранее проведенные авторами экспериментальные исследования показывают, что в метеорологически активном регионе Антарктического полуострова мощные погодные возмущения влияют на состояние ионосферы, в первую очередь на спорадические образования в E- и F-области [5-7]. Например, в E-области ионосферы на высотах динамо-слоя (120 ÷ 130 км) прохождение АГВ тропосферного происхождения приводит к модуляции проводимостей и токовых систем, и, как следствие, к пространственно-временным изменениям магнитных и электрических полей [3]. Связанные с АГВ вариации горизонтальных скоростей нейтральной компоненты в E-области могут при-

водить и к формированию спорадических слоев за счет перераспределения ионизированной компоненты в результате действия механизмов ветрового сдвига [4].

Одним из признаков, по которым можно идентифицировать ионосферные возмущения, стимулированные волновыми процессами тропосферного происхождения, является корреляция вариаций параметров ионосферы с состоянием тропосферы. Пространственную волновую структуру неоднородностей в большинстве случаев не удается восстановить при выполнении наблюдений из одного пункта, за исключением фотографирования свечения ночного неба [8, 9]. Для исследования пространственно-временных особенностей ионосферных возмущений успешно используются данные сетей станций глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [10-14].

При радиопросвечивании околоземной плазмы сигналами ГНСС на двух частотах благодаря дисперсии показателя преломления сверхвысокочастотных радиоволн в ионосфере удается оценить полное электронное содержание и его вариации вдоль луча зрения между спутниковым передатчиком и наземным приемником. В последние годы возможности этого метода значительно расширились за счет введения в строй новых навигационных спутников и существенного расширения сети перманентных станций (ПС).

Целью настоящей работы являлось исследование и количественная оценка влияния мощных метеорологических явлений в тропосфере на ионосферу над Европейским континентом. В работе решались задачи построения пространственно-временных распределений тропосферных и ионосферных возмущений, а также оценки степени их связи в области действия циклона “Кирилл” в январе 2007 г.

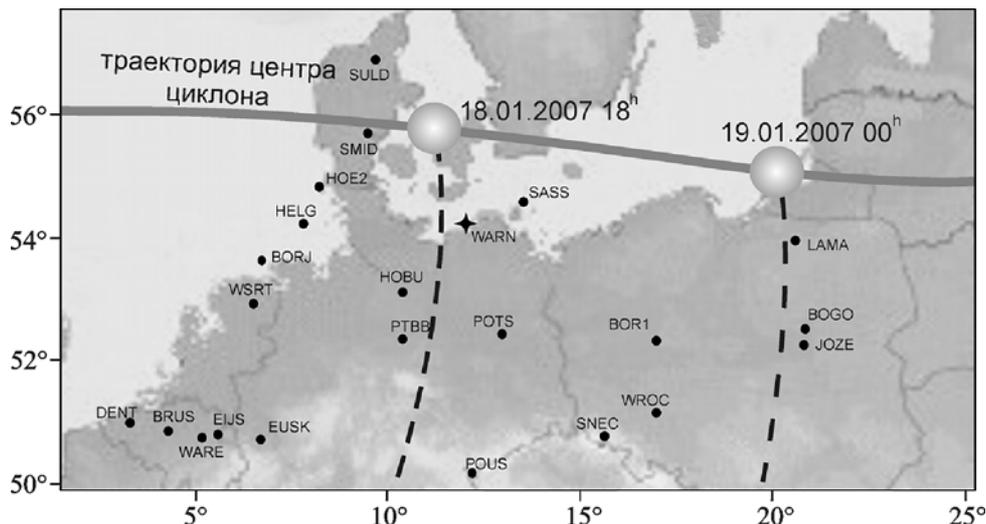
## 2. Экспериментальные исследования

В процессе исследования воздействия тропосферных возмущений на состояние ионосферы анализировались метеорологические, ионосферные и геомагнитные данные. Состояние погоды оценивалось по измерениям температуры и давления на ПС, по сведениям

метеорологических обсерваторий, а также по метеорологическим картам, любезно предоставленным Гидрометцентром Черного и Азовского морей (г. Одесса). В январе 2007 г. метеоситуация над Европой характеризовалась повышенной активностью атмосферных фронтов в течение всего месяца, с максимумом 18–20 января во время действия штормового циклона “Кирилл” [15]. Шторм был особенно сильным в Великобритании, странах Бенилюкса, Германии и Польше. Центр циклона смещался с запада на восток примерно вдоль 55 параллели (рис. 1). Штормовой ветер, ливневые осадки, и, несмотря на зимнее время, грозы наблюдались в области действия фронтов циклона, несколько южнее его центра. С полудня 19 января на территории Германии и Польши началась нормализация погодных явлений и быстрый рост атмосферного давления.

Анализ геомагнитной ситуации показал, что лишь несколько дней в начале и в самом конце месяца характеризовались повышенной магнитной активностью. При этом с 6 по 29 января существенных возмущений геомагнитного поля не отмечалось, что явилось благоприятным фоном для поиска ионосферных эффектов тропосферной природы.

В качестве информации о состоянии ионосферы в работе использовались первичные данные приемников ПС, а также глобальные карты полного электронного содержания (ПЭС) в вертикальном столбе ионосферы единичной площади, доступные в Интернете на веб-страницах службы IGS (The International GNSS Service). Суть алгоритма обработки данных ГНСС с целью оценки параметров ионосферы состояла в следующем. На основе измерений фазового пути сигналов ГНСС формировались временные ряды разностей ионосферных задержек на двух частотах вдоль луча зрения “спутник – приемник”. Эти разности пропорциональны наклонному полному электронному содержанию (НПЭС) в соответствующем направлении. НПЭС, так же как и ПЭС, выражается в единицах Total Electron Content Unit ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ). В работе использовались данные только тех спутников, угол места которых для каждой станции пре-



**Рис. 1.** Фрагмент сети европейских ПС ГНСС, траектория центра циклона “Кирилл”, а также расположение локальных минимумов давления 18 января в 18:00 UT и 19 января в 00:00 UT (пунктирные линии)

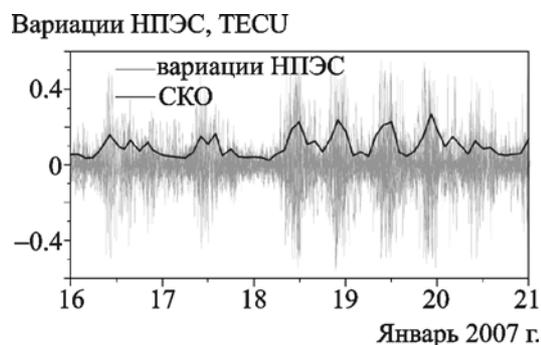
вышал 60°. Как правило, одновременно в зоне приема отдельной ПС наблюдается 2–3 таких спутника, сигналы каждого просвечивают ионосферу в радиусе ~200 км от ПС в течение полутора-двух часов непрерывно. В среднем каждые сутки наблюдалось до 40 пролетов спутников. Временное разрешение данных составляло 30 с.

Из полученных временных рядов удалялся тренд, связанный с регулярным изменением электронного содержания за счет движения спутника и суточным ионосферным циклом. Используемый в настоящей работе алгоритм обработки первичных данных подобен описанному в литературе [10–14] и отличается только тем, что исключаемый тренд аппроксимировался полиномом.

Вообще говоря, при такой обработке данных нельзя однозначно разделить пространственные и временные характеристики ионосферных вариаций в зоне прохождения сигнала спутника через ионосферу. Из-за движения спутника эта зона перемещается со скоростью, сопоставимой с характерной скоростью перемещающихся ионосферных возмущений. Однако для решения поставленных задач нет необходимости в разделении вариаций НПЭС на временную и пространственную компоненты.

Важно иметь возможность сопоставлять уровни возмущенности ионосферы, количественно описываемые среднеквадратичным отклонением (СКО) вариаций НПЭС, с уровнями возмущенности тропосферы.

СКО вариаций НПЭС, отнесенные к моментам кульминации в пролетах спутников, являются мерой возмущенности ионосферы над данной станцией. На рис. 2 показан фрагмент временного ряда вариаций НПЭС для наблюдаемых спутников над ПС WARN (г. Варнемюнде, ФРГ), располагавшейся в зоне



**Рис. 2.** Фрагмент временного ряда вариаций НПЭС над станцией WARN (г. Варнемюнде, ФРГ)

максимальной активности фронтальных процессов урагана “Кирилл”.

На рис. 3 изображены усредненные за месяц суточные вариации ПЭС и СКО НПЭС над станцией WARN. Как видно, СКО НПЭС качественно повторяет изменения ПЭС, что вполне естественно, поскольку величина вариаций электронной плотности в ионосфере, как правило, пропорциональна регулярному значению концентрации. Нормирование СКО НПЭС на текущее значение ПЭС позволяет исключить суточную компоненту. Полученные относительные вариации СКО НПЭС представляют собой индекс возмущенности ионосферы (ИВИ).

На рис. 4 представлены временные ряды вариаций атмосферного давления и ИВИ над станцией WARN, сглаженные полусуточным весовым окном. Можно отметить антикорреляцию ИВИ и атмосферного давления (шкала

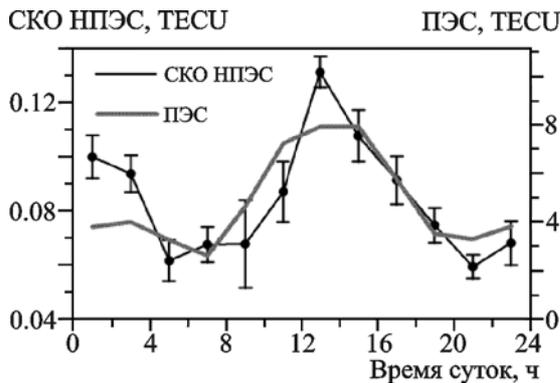


Рис. 3. Суточный ход усредненных за январь 2007 г. вариаций СКО НПЭС и ПЭС над станцией WARN

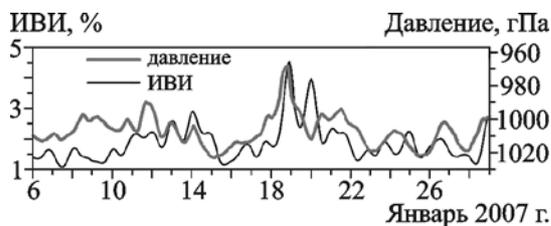


Рис. 4. Временные ряды давления и ИВИ над станцией WARN

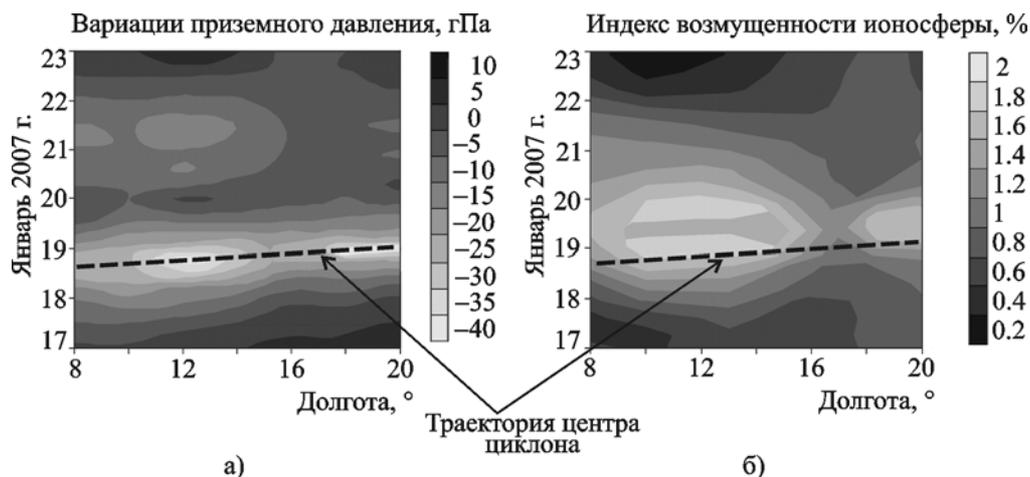
давления инвертирована) во время прохождения штормового циклона, характеризовавшегося минимумом атмосферного давления. Сразу после минимума давления отмечается максимум ИВИ на уровне 4 %, тогда как его значения в невозмущенных условиях составляли  $1 \div 2.5$  %. Аналогичная картина получена для всех станций ГНСС, данные которых были включены в обработку (16 станций).

На рис. 5 в координатах “долгота – время” представлены распределения давления (рис. 5, а) и индекса возмущенности (рис. 5, б), усредненные по широте в полосе  $52^\circ \div 56^\circ$  с. ш. Приведена также “траектория” движения центра циклона “Кирилл”. На рис. 5, а отчетливо выделяется зона локального минимума давления, перемещавшаяся с запада на восток. На рис. 5, б видна область интенсивных ионосферных возмущений, предположительно связанных с тропосферными событиями. Следует отметить, что область повышенной возмущенности ионосферы достаточно протяженная в пространстве. Она прослеживается как минимум с  $8^\circ$  в. д. по  $20^\circ$  в. д. (рис. 5, б), что на рассматриваемых широтах соответствует линейному размеру примерно 1000 км.

### 3. Обсуждение и интерпретация результатов

Полученные данные демонстрируют увеличение возмущенности ионосферы над Центральной Европой во время прохождения циклона “Кирилл”. Вероятнее всего, это связано с генерацией АГВ в зоне действия активного циклона и их распространением на ионосферные высоты.

В тропосфере, в области действия циклона и связанных с ним атмосферных фронтов развиваются восходящие потоки воздуха. Стратосфера – устойчивая область с положительным вертикальным градиентом температуры – выступает в роли барьера, препятствующего проникновению этих потоков на большие высоты. В области тропопаузы, на границе области восходящих потоков атмосферного фронта и устойчивых стратосферных слоев, действует описанный в литературе механизм гене-



**Рис. 5.** Распределения вариаций давления (а) и ИВИ (б) в координатах долгота-время в период прохождения циклона

рации АГВ [16]. В отличие от восходящих потоков воздуха АГВ могут свободно распространяться в стратосфере вверх.

Выше, в мезосфере, условия распространения АГВ ухудшаются, поскольку градиент профиля температуры становится отрицательным. Тем не менее зимой, в отличие от других сезонов, модуль отрицательного градиента температуры в мезосфере имеет относительно небольшие значения [17], ему соответствуют достаточно высокие действительные значения частоты Бранта–Вяйсяля. Поэтому в январе (во время циклона “Кирилл”) условия распространения АГВ в мезосфере могли быть весьма благоприятными для их проникновения в ионосферу. На мезосферных высотах происходило лишь незначительное “обрезание” частотного спектра АГВ сверху, в области больших частот и соответственно малых масштабов.

Достигнув ионосферы, АГВ оказывают влияние на динамику ионизированной компоненты. На высотах Е-области плазменные возмущения могут возникать благодаря действию механизмов, связанных с динамо-эффектом [4]. В F-области к развитию ионосферных неоднородностей могут приводить пространственные резонансы скоростей АГВ и дрейфа плазмы [18]. В нашем случае невоз-

можно идентифицировать высоты и типы ионосферных возмущений, поскольку рассматривались флуктуации полного электронного содержания. Однако с помощью предложенной методики обработки данных радиопросвечивания можно констатировать увеличение уровня возмущенности ионосферы в целом над областью активного тропосферного процесса.

#### 4. Выводы

В работе проведен сравнительный анализ метеообстановки и возмущенности ионосферы над Европой в январе 2007 г.

В качестве меры ионосферной возмущенности использован индекс, который определен как СКО вариаций НПЭС между приемником и спутниками, отнесенное к текущему значению ПЭС над приемником. Временные ряды индексов, построенные для нескольких ПС, позволили получить пространственно-временное распределение степени возмущенности ионосферы в региональном масштабе.

Показано, что во время действия штормового циклона “Кирилл” 18–19 января 2007 г. интенсивность ионосферных возмущений возрастала. ИВИ увеличивался в несколько раз по отношению к фоновому уровню.

Из полученных экспериментальных результатов следует, что перенос тропосферных возмущений на ионосферные высоты имел место над обширной территорией Центральной и Западной Европы. Отмеченный эффект может быть объяснен тем, что штормовой циклон являлся мощным источником атмосферных гравитационных волн, которые, распространившись на ионосферные высоты, привели к повышению уровня возмущенности ионосферной плазмы.

Работа выполнена в рамках бюджетной НИР “Ятаган” при частичной поддержке российско-украинского гранта, финансировавшегося Российским фондом фундаментальных исследований (грант 08-02-90437-Укр) и Национальной академией наук Украины (грант 0108U004878). Авторы благодарят начальника Гидрометцентра Черного и Азовского морей В. Н. Сытова, любезно предоставившего метеорологические карты из архива Гидрометцентра.

### Литература

1. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. В 2-х томах. – М.: Мир, 1986 г. – Т. 1, 397 с., Т. 2, 410 с.
2. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
3. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Литвиненко Л. Н., Лизунов Г. В., Гровс К., Молдвин М. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №2. – С. 130-151.
4. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
5. Зализовский А. В., Ямпольский Ю. М. F-рассеяние как индикатор тропосферно-ионосферного взаимодействия // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, №1. – С. 33-42.
6. Зализовский А. В. Роль тропосферных процессов в формировании спорадических слоев E-области ионосферы над Антарктическим полуостровом // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2008. – Т. 13, №1. – С. 26-38.
7. Ямпольский Ю. М., Зализовский А. В., Занимонский Е. М., Лизунов Г. В., Лисаченко В. Н. Связь атмосферной и космической погодных систем // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, №5. – С. 6-36.
8. Nielsen K., Teylor M. J., Hibbins R. E., Jarvis M. J. Climatology of short-period mesospheric gravity waves over Halley, Antarctica (76S, 27W) // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2009. – Vol. 71, No. 7-8. – P. 991-1000.
9. Shiokawa K., Otsuka Y., Tsugawa T., et al. Geomagnetic conjugate observation of nighttime medium-scale and large-scale traveling ionospheric disturbances: FRONT3 campaign // J. Geophys. Res. – 2005. – Vol. 110, A05303, doi: 10.1029/2004JA 010845.
10. Ding F., Wan W., Liu L., Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Perevalova N. P. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003–2005 // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113, A00A01, doi: 10.1029/2008JA013037.
11. Лисаченко В. Н., Занимонский Е. М., Ямпольский Ю. М., Вельгош П. Исследование вариаций полного электронного содержания ионосферы в регионе Антарктического полуострова // Радиоп физика и радиоастрономия. – 2007. – Т. 12, №1. – С. 20-32.
12. Захаров В. И., Зиенко А. С., Куницын В. Е. Распространение радиосигналов GPS при различной солнечной активности // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13, №8. – С. 51-57.
13. Afraimovich E. L., Perevalova N. P., Zhivetiev I. V. Relative amplitude and total content variations depending on geomagnetic activity // Adv. Space Res. – 2008. – Vol. 42. – P. 1231-1237.
14. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
15. Fink A. H., Brücher T., Ermert V., Krüger A., Pinto J. G. The European storm Kyrill in January 2007: synoptic evolution, meteorological impacts and some considerations with respect to climate change // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2009. – Vol. 9, No. 2. – P. 405-423.
16. Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеоэффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 272 с.
17. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / Под ред. Ю. С. Седунова (председатель), С. И. Авдюшина, Е. П. Борисенкова, О. А. Волковицкого, Н. Н. Петрова, Р. Г. Рейтенбаха, В. И. Смирнова, А. А. Черникова. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.
18. Гершман Б. Н., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д., Чернобровкина Н. А. Явление F-рассеяния в ионосфере. – М.: Наука, 1984. – 143 с.

**Іоносферні збурення над Європою,  
стимульовані потужним атмосферним  
фронтом**

**Є. М. Занимонський, А. В. Залізовський,  
В. М. Лисаченко, А. О. Сопін,  
Ю. М. Ямпольський**

Викладено попередні результати дослідження варіацій повного електронного вмісту іоносфери над Центральною Європою, зумовлених тропосферними процесами у цьому регіоні у січні 2007 р. Використано дані європейської мережі перманентних станцій глобальної навігаційної супутникової системи. Запропоновано використовувати індекс збуреності іоносфери, який дозволяє відстежувати її реакцію на зовнішні впливи.

**Ionospheric Disturbances  
over Europe Stimulated by Strong  
Atmospheric Front**

**Y. M. Zanimonskiy, A. V. Zalizovski,  
V. N. Lisachenko, A. O. Sopin,  
and Y. M. Yampolski**

The preliminary results are presented of investigation of variations in the ionospheric total electron content in January, 2007 over Central Europe which can be associated with tropospheric processes in this region. Data from a network of European permanent GNSS stations were used in the study. An index of ionospheric disturbance is suggested to characterize ionospheric response to external influences.