ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В. Н. КАРАЗИНА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НАНУ IEEE AP/MTT/ED/AES/GRS/NPS Societies East Ukraine Joint Chapter ИНСТИТУТ ИОНОСФЕРЫ МОНУ И НАНУ ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ ИМЕНИ А. Я. УСИКОВА НАНУ

## РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ (*РФИИ – 2013*)

## СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ І Украинской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.А. Мисюры



Харьков, 24-25 октября 2013

УДК. 550.388

Редакционная коллегия:

О.Ф. Тырнов, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Л.Ф. Черногор, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Ю.М. Ямпольский, РИ НАНУ, Харьков, О.К. Черемных, ИКИ НАНУ - ГКАУ, Киев, А. М. Цымбал, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина (ответственный редактор), В.Л. Дорохов (технический редактор)

Утверждено решением Ученого совета Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина (протокол №8 от 30 сентября 2013 г.)

Доклады печатаются в авторской редакции

В сборник [электронный ресурс] включены тезисы докладов, представленных «Радиофизические исследования ионосферы». на I Украинской конференции Доклады отражают результаты современных исследований украинских И проблемам диагностики ионосферы и околоземного зарубежных ученых по пространства с использованием радиофизических методов. Конференция посвящена 100-летию co рождения известного украинского ученого, профессора дня В.А. Мисюры.

- © Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2013
- © Радиоастрономический институт, НАНУ, 2013
- © Институт ионосферы, МОНУ и НАНУ, 2013
- © ИРЭ имени А. Я. Усикова, НАНУ, 2013

ISBN 978-966-285-016-1

# ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

## РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРНО-МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ»

#### Ю. М. Ямпольский

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины Украина, Харьков, 61002, Червонопрапорна, 4. <u>yampol@rian.kharkov.ua</u>

Радиофизические исследования околоземного пространства на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (УАС) продолжают и развивают традиции британских коллег по изучению геокосмоса, которые в 1996 году передали свою старейшую антарктическую базу «Майкл Фарадей» под юрисдикцию Украины. Научное направление – «геокосмические исследования» является одним из основных в Государственной программе исследований Украины в Антарктике, утвержденной к исполнению до 2020 года. С момента передачи станции Радиоастрономический институт НАН Украины утвержден в роли Головной организацией по этому направлению. Харьковские ученые и инженеры за годы существования УАС успешно провели в Антарктике 26 зимовок, принимали участие в трех морских походах и пяти сезонных экспедициях, отмечены многими государственными и ведомственными наградами.

Основными научными задачами, решаемыми на УАС по данному направлению, являются исследования: a) энергообмена в системе тропосфера-ионосферамагнитосфера; б) глобальной грозовой активности и техногенных излучений в УНЧ -СНЧ диапазонах; в) магнитосопряженных эффектов в северном и южном полушариях; г) особенностей распространения волн на сверхдальних радиолиниях; д) эффектов генерации и распространения АГВ; е) зимней ионосферной аномалии. Специальное внимание в Программе уделено техническому обслуживанию действующих на УАС приборных электромагнитных комплексов, а также модернизации уже существующих и созданию новых энергосберегающих дистанционных методов радиозондирования плазменной оболочки Земли и поверхности мирового океана.

В докладе представлен ряд новых научных результатов по исследованиям тропосферы, ионосферы и магнитосферы Земли в регионе Антарктического полуострова, полученных с участием выпускников кафедры космической радиофизики ХНУ им. В.Н. Каразина.

## СВОЙСТВА ИСКУССТВЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ ЕЁ МОДИФИКАЦИИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ

#### В.Л. Фролов

ФГБНУ НИРФИ, Нижний Новгород, Россия. e-mail: *frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru*)

Эксперименты по модификации ионосферы Земли были начаты в России в середине 60-х годов прошлого столетия и активно продолжаются по настоящее время. Выполненные за прошедшие годы отечественные, а также зарубежные исследования привели к пониманию того (см., например, статьи в специальных выпусках журналов [1-9], обзоры [10-14] и цитируемую в них многочисленную литературу), что мощные КВ радиоволны О-поляризации, излучаемые в вертикальном или в близком к вертикальному направлении, приводят к нагреву ионосферной плазмы и возбуждают в *F*<sub>2</sub>-области ионосферы вблизи высоты их отражения интенсивную искусственную ионосферную турбулентность (ИИТ), которая включает в себя возмущения плотности и температуры плазмы, генерацию высокочастотных и низкочастотных плазменных колебаний, ускорение электронов до сверхтепловых энергий и вызванные ими оптические свечения нейтральной атмосферы и дополнительную её ионизацию, генерацию искусственного радиоизлучения, возбуждение перемещающихся ионосферных возмущений, генерацию искусственных периодических неоднородностей, генерацию низкочастотных излучений в ОНЧ-СНЧ-КНЧ диапазонах и др.

В настоящем докладе рассматриваются результаты экспериментальных исследований пространственной структуры возмущённой области ионосферы (ВО), которая формируется в результате развития, в силу тех или иных причин, искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) различных масштабов. При этом свойства ИИН в сильной степени зависят от ионосферных условий (времени суток и естественного уровня возмущённости ионосферы), а также от характеристик мощной радиоволны (её частоты, мощности, поляризации и временного режима излучения).

В докладе представлены только результаты исследований, выполненных на среднеширотном нагревном стенде СУРА (ФГБНУ НИРФИ, Н. Новгород). Его описание можно найти в [14]. Для изучения характеристик ИИН используются различные методы их диагностики. Среди них: ионозондовые измерения, метод пробных волн, ракурсное рассеяние радиоволн КВ и УКВ диапазонов на вытянутых вдоль геомагнитного поля мелкомасштабных ( $l_{\perp} \approx 1 - 200$  м) неоднородностях, просвечивание ВО ионосферы сигналами низкоорбитальных и высокоорбитальных навигационных ИСЗ, метод радиотомографии, оптические измерения, прямые измерения с борта ИСЗ и др.

В дневных условиях волна накачки (ВН) отражается, как правило, на высотах  $\sim 180 - 220$  км. При наличии мощных *D* и *E* слоёв значительная доля её энергии поглощается в нижних слоях ионосферы. Это приводит к сильному разогреву плазмы и появлению кроссмодуляционных эффектов при распространении радиоволн [15,16]. При нагреве плазмы происходит нарушение ионизационно-рекомбинационного баланса, что вызывает увеличение плотности плазмы на высотах 130 – 170 км; это может рассматриваться как образование дефокусирующей линзы на этих высотах [17]. Последнее вызывает значительное (до 20 дБ) ослабление плотности потока энергии ВН в верхней ионосфере. Совместное влияние большого поглощения мощной радиоволны в нижней ионосфере и дефокусирующей линзы, а также достаточно низкие (~ 200 км) высоты отражения мощной радиоволны, приводит к тому, что в дневные часы ИИТ в

верхней ионосфере имеет невысокую интенсивность, поскольку не все формирующие её процессы могут развиваться достаточно эффективно. В частности, не наблюдается, как правило, развития  $F_{spread}$  на ионограммах, либо он имеет существенно более низкую интенсивность, чем в вечерних или ночных условиях модификации ионосферы мощным КВ радиоизлучением. Также в дневных условиях интенсивность мелкомасштабных ИИН оказывается значительно более слабой, чем в вечерней ионосфере [18].

В качестве одного из проявлений нагрева плазмы нижней ионосферы укажем также обнаруженное недавно явление уменьшения интенсивности микроволнового излучения в линии озона на высотах ~ 50 – 60 км [19,20], которое связывается с влиянием на атмосферу внутренних гравитационных волн, генерирующихся при периодическом нагреве ионосферной плазмы [21-23].

В условиях вечерней и особенно ночной ионосферы, когда ее D и E слои уже не оказывают сильного влияния на распространение мощной радиоволны и не происходит образования дефокусирующей линзы, вблизи высоты отражения ВН наблюдается ИИТ высокой интенсивности. При ЭТОМ развитие спектр генерируемых неоднородностей захватывает диапазон масштабов от долей метра до десятков километров. Было также установлено, что ИИН генерируются не только в ограниченной по высоте (~10 - 30 км) области вблизи высоты отражения ВН, но и далеко за её пределами. Так через несколько секунд после начала излучения ВН неоднородности с масштабами 0.1 – 1 км обнаруживаются во всей области высот от высот ~ 100 км до высоты отражения ВН [24-26]. Помимо ИИН вблизи высоты ВН, где имеет место наиболее интенсивный разогрев плазмы, образуется полость с уменьшенной до 30% плотностью плазмы [13,27-29], которая действует как фокусирующая линза. В частности, совместное действие этой линзы и ИИН километровых масштабов, кроме обусловленных рефракцией радиоволн эффектов, в определённых условиях может обеспечить проникновение мощной радиоволны в закритическую плазму и влиять на состояние внешней ионосферы [30].

В последние годы был рассмотрен теоретически и исследован экспериментально эффект магнитного зенита [12-14,28,31,32], когда наиболее интенсивное развитие ИИН происходит при распространении мощной радиоволны *О*-поляризации вдоль силовых линий геомагнитного поля в области её взаимодействия с плазмой. Были также выполнены исследования гирогармонических свойств генерации ИИН [33,34]. Объяснение особенностей спектра рассеянных сигналов, когда частота ВН немного выше частоты гирогармоники, привели в [35] к выводу, что в этих условиях происходит генерация интенсивных неоднородностей с размерами  $l_{\perp} \approx 10 - 20$  см, обнаружение которых экспериментально является наиболее значимой задачей сегодняшнего дня. В [34] приведены результаты зондирования ВО ионосферы сигналами GPS, которые демонстрируют первые наши попытки обнаружить такие неоднородности.

В 2005 – 2010 гг. с помощью уникальной бортовой аппаратуры французского микроспутника DEMETER были выполнены исследования свойств искусственной плазменной турбулентности на высотах ~700 км. В частности, была обнаружена генерация дактов с увеличенной на 15 – 80% плотностью плазмы и размерами 70 – 110 км поперёк геомагнитного поля при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными радиоволнами *О*-поляризации [36-38]. Эти дакты способны влиять на распространение ОНЧ-волн [39], а при определённых условиях — стимулировать высыпание энергичных электронов из радиационных поясов Земли за счёт возбуждения магнитосферного мазера [40].

В заключение заметим, что периодическое воздействие мощными КВ радиоволнами на ионосферу Земли вызывает генерацию перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), пространственные масштабы которых составляют

сотни километров. В экспериментах на стенде СУРА их диагностика осуществляется с помощью доплеровского радара вертикального зондирования ионосферы, расположенного около г. Харькова (Украина). Детальное описание радара, методов обработки принимаемых сигналов и полученных результатов представлено в [21-33]. Выполненные измерения показали, что, спустя 40 – 50 мин после начала модификации ионосферы, над г. Харьковом начинают наблюдаться периодические изменения высоты отражённого от ионосферы зондирующего сигнала. Характеристики этих вариаций отвечают распространению внутренних гравитационных волн на ионосферных высотах. Установлено, что наиболее эффективно возбуждаются волны с периодами 15 – 30 мин.

Подводя итоги выполненным исследованиям, можно заключить, что при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами *О*-поляризации генерация ИИН различных масштабов наблюдается от высот её *E*-области до высот внешней ионосферы. В горизонтальном направлении искусственные неоднородности плотности плазмы регистрируются на расстояниях до 250 км от стенда, что намного превышает размер области (~100 км), засвеченной пучком мощных радиоволн. Крупномасштабные ионосферные возмущения, связанные с генерацией внутренних гравитационных волн, регистрируются на расстояниях до 1000 км от стенда СУРА (на самом деле, они должны регистрироваться и на больших дальностях). Одним из важных следствий выполненных в последние годы исследований явилось получение экспериментальных фактов, доказывающих, что модификация ионизированной компоненты атмосферы приводит к возмущению и её нейтральной компоненты. Механизм появления таких возмущений в настоящее время ещё не разработан.

### Литература

- 1. Radio Sci. 1974. Vol. 9. No. 11.
- 2. J. Atmos. Terr. Phys. 1982. Vol. 44. No. 12.
- 3. J. Atmos. Terr. Phys. 1985. Vol. 47. No. 12.
- 4. J. Atmos. Terr. Phys. 1997. Vol. 59. No. 18.
- 5. Изв. вузов Радиофизика. 1994. Т. 37. № 5.
- 6. Изв. вузов Радиофизика. 1999. Т. 42. № 7,8.
- 7. Изв. вузов Радиофизика. 2005. Т. 48. № 9.
- 8. Изв. вузов Радиофизика. 2008. Т. 51. № 11.
- 9. Изв. вузов Радиофизика. 2012. Т. 55. № 1-2.
- 10. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н., Митяков Н.А., Фролов В.Л. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор). // Изв. вузов Радиофизика. 1987. Т. 30. № 2. С. 208-225.
- 11. Stubbe P. and Hagfors T. The Earth's ionosphere: A wall-less plasma laboratory. // Surveys in Geophysics. 1997. Vol. 18. P. 57.
- 12. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере. // УФН. 2007. Т. 177 № 11. – С. 1145-1177.
- Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Комраков Г.П., Котик Д.С., Митяков Н.А., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Сергеев Е.Н., Терещенко Е.Д., Толмачева А.В., Урядов В.П., Худукон Б.З. Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением. // УФН. 2007. Т. 17. № 3. С. 330-340.

- 14. Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н., Котик Д.С., Токарев Ю.В. Стенд «СУРА»: исследования атмосферы и космического пространства (обзор). // Изв. вузов Радиофизика. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 545-576.
- 15. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. // Изд. «Наука». Москва. 1973.
- 16. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. // Изд. «Наука». Москва. 1967.
- 17. Бойко Г.Н., Васьков В.В., Голян С.Ф. и др. Исследование дефокусировки радиоволн в ионосфере при воздействии мощного радиоизлучения. // Изв. вузов Радиофизика. 1985. Т. 28. Вып. 8. С. 960-971.
- 18. Fialer P.A. Field-aligned scattering from a heated region of the ionosphere Observations at HF and VHF. // Radio Sci. 1974. Vol. 9. No. 11. P. 923-940.
- 19. Куликов Ю.Ю., Григорьев Г.И., Красильников А.А., Фролов В.Л. Вариации микроволнового излучения мезосферы при нагреве ионосферы мощными короткими радиоволнами. // Изв. вузов Радиофизика. 2012. Т. 55. № 1-2. С. 57-65.
- 20. Куликов Ю.Ю., Фролов В.Л., Григорьев Г.И., Демкин В.М., Комраков Г.П., Красильников А.А., Рыскин В.Г. Воздействие мощным КВ радиоизлучением на интенсивность микроволнового излучения озона средней атмосферы. // Геом. и Аэрон. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 102-109.
- 21. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Пушин В.Ф. Вариации спектра ионосферных волновых возмущений при периодическом нагреве плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. // Изв. вузов Радиофизика. – 2011. – Т.54. – № 2. – С.81.
- 22. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением. // Изв. вузов Радиофизика. 2012. Т. 55. № 1-2. С. 14-36.
- 23. Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Пушин В.Ф. Колебания инфразвукового диапазона в ионосфере при воздействии на нее мощным радиоизлучением. // Изв. вузов Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 5. – С. 327-340.
- 24. Фролов В.Л., Беликович В.В., Бахметьева Н.В., Ушаков А.А. Генерация искусственных ионосферных неоднородностей на высотах 130 170 км. // ХХІІ Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону. 2008. Труды конференции. Т. 2. С. 134–137.
- 25. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Вяхирев В.В., Фролов В.Л., Калинина Е.Е. Обратное рассеяние радиоволн искусственными неоднородностями ионосферной плазмы на высотах 120 – 180 км. // Известия вузов Радиофизика. – 2010. – Т. 53. – № 5-6. – С. 338-355.
- 26. Бахметьева Н.В., Фролов В.Л., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Болотин И.А., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю. О формировании искусственных плазменных возмущений в нижней ионосфере. // Изв. вузов Радиофизика. 2012. Т. 55. № 1-2. С. 106-121.
- 27. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V., Zybin K.P., Frolov V.L., Myasnikov E.N., Muravieva N.V., Carlson H.C. Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modification caused by a powerful HF-wave and magnetic zenith effect at mid-latitudes. // Physics Letters A, 325. – 2004. – P. 381-388.
- 28. Терещенко Е.Д., Миличенко А.Н., Фролов В.Л., Юрик Р.Ю. Наблюдение эффекта магнитного зенита с использованием сигналов спутников GPS/GLONASS. // Изв. вузов Радиофизика. 2008. Т. 51. № 11. С. 934-938.

- 29. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Frolov V.L., Komrakov G.P., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. Sounding of HF heating-induced artificial ionospheric disturbances by navigation satellite radio transmissions. // Radio Sci. 2012. Vol. 47. RS0L15, doi:10.1029/2011RS004957.
- 30. В.Л. Фролов, Н.А. Митяков, Е.А. Шорохова, М. Парро. Структура электрического поля мощной КВ радиоволны во внешней ионосфере Земли. // Изв. вузов Радиофизика. – 2013 (принята в печать).
- 31. Фролов В.Л., Комраков Г.П., Куницын В.Е., Падохин А.М., Васильев А.В., Курбатов Г.А. Зондирование возмущенной излучением нагревного стенда Сура ионосферы сигналами навигационных ИСЗ системы GPS. // Известия вузов Радиофизика. 2010. Т. 53. № 7. С. 421-443.
- 32. Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Мясников Е.Н., Рахлин А.В., Фролов В.Л. Исследование эффекта магнитного зенита по результатам наблюдений за искусственной ионосферной турбулентностью. // XXII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону. – 2008. – Труды конференции. – Т. 2.– С. 179–181.
- 33. Фролов В.Л., Недзвецкий Д.И., Урядов В.П., Иванов В.А., Иванов Д.В., Лащевский А.Р., Рябова Н.В. Гирогармонические свойства среднемасштабной искусственной ионосферной турбулентности, проявляющиеся при нагреве F<sub>2</sub>области ионосферы мощной радиоволной О-поляризации. // Изв. вузов Радиофизика. – 2008. – Т.51. – № 5. – С. 367-375.
- 34. Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Вертоградова Е.Г., Акчурин А.Д., Бочкарев В.В., Дрешер А.М., Зыков Е.Ю., Латыпов Р.Р., Петрова И.Р., Юсупов К.М., Куницын В.Е., Падохин А.М., Курбатов Г.А. Гирогармонические свойства генерации искусственных ионосферных неоднородностей. // Изв. вузов Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 6. – С. 393-420.
- 35. Gurevich A.V., Zybin K.P. // Phys. Lett. A 358. 2006. P. 159-165.
- 36. Рапопорт В.О., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Марков Г.А., Белов А.С., Парро М., Раух Дж.Л. Некоторые результаты измерения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ радиоизлучением стенда Сура. // Изв. вузов Радиофизика. – 2007. – Т. 50. – № 8. – С.709–721.
- 37. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П., Белов А.С., Марков Г.А., Парро М., Рош Ж.Л., Е.В. Мишин. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением. // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т. 88. – Вып. 12. – С. 908-913.
- 38. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков Г.П., Белов А.С., Марков Г.А., Парро М., Рош Ж.Л., Е.В. Мишин. Спутниковые измерения характеристик плазменных возмущений, создаваемых при нагреве ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением стенда Сура. // Изв. вузов Радиофизика. – 2008. – Т. 51. – № 11. – С. 915-934.
- Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V., Komrakov G.P., Ryzhov N.A., Markov G.A., Belov A.S., Parrot M., and Rauch J.-L. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility. // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. A10322, doi:10.1029/2010JA015484.
- 40. Марков Г.А., Белов А.С., Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Парро М., Рош Ж.-Л. Возбуждение магнитосферного мазера воздействием на ионосферу Земли мощным КВ радиоизлучением наземного передатчика. // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 138. – Вып. 6(12). – С. 1037-1042.

## ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ И ВЫСОТЫ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F2 КАК ЧАСТЬ КОНЦЕПЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ И ОСЕДАНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

#### А. Д. Данилов

Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова

В настоящее время активно обсуждается концепция охлаждения и оседания средней и верхней атмосферы из-за увеличения в ней количества парниковых газов. Она базируется на нескольких группах экспериментальных данных, основными из которых являются: уменьшение температуры мезосферы согласно эмиссионным и лидарным данным, уменьшение плотности на термосферных высотах по данным о торможении спутников и сильное уменьшение ионной температуры в области F ионосферы по измерениям методом некогерентного рассеяния. В такой ситуации следует ожидать систематических трендов основных параметров слоя F2 — foF2 и hmF2. Был проведен тщательный анализ имеющихся банков данных ионосферных измерений методом вертикального зондирования, были устранены встречающиеся там ошибочные данные и был проведен тщательный анализ трендов foF2 и hmF2 за период конца 90-х и начала 2000-х годов. Было получено, что и foF2 и hmF2 демонстрируют статистически значимые отрицательные тренды для всех станций (10 по hmF2 и 12 по foF2), для которых удалось найти надежные данные за необходимый период времени. Полученные тренды согласуются с указанной концепцией охлаждения и оседания верхней атмосферы и позволяют сделать некоторые выводы о механизмах формирования указанных трендов.

## ИССЛЕДОВАНИЯ УНЧ-ВОЗМУЩЕНИЙ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ «РЕЗОНАНС»

#### О.К. Черемных, В. Н. Ивченко

Институт космических исследований НАН та ГКА Украины oleg.cheremnykh@gmail.com

Активная фаза международного орбитального космического проекта РЕЗОНАНС, в котором участвуют 12 стран, начнется в 2014 – 2016 гг. Украинские ученые готовятся принять участие в проекте: определяются теоретические модели явлений в магнитосферной плазме, в том числе и в радиационных поясах, изучаются взаимодействие магнитосферы И ионосферы, механизмы генерации магнитогидродинамических волн, уточняются методики интерпретации космических и наземных измерений, их комплексирование. В докладе рассмотрены указанные вопросы и определены конкретные задачи, над решением которых будут заниматься украинские ученые в проекте.

Работа поддержана ДФФД, проект № Ф 53.6/036.

## ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАНСЫ: НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАФЕДРЕ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОФИЗИКИ РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА ХГУ

#### А. П. Николаенко

Отдел дистанционного зондирования, ИРЭ им. А.Я. Усикова НАНУ, Ак. Проскуры 12, Харьков 61085 E-mail: <u>sasha@ire.kharkov.ua</u>

В докладе приводится краткая историческая справка о кафедре космической радиофизики середины 60-х. Дано популярное описание явления глобального электромагнитного (шумановского) резонанса, рассказано о задачах, сформулированных на кафедре, приводится иллюстративный материал о современных исследованиях окружающей среды с помощью записей шумановского резонанса.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА В СИСТЕМЕ ЗЕМЛЯ – АТМОСФЕРА – ИОНОСФЕРА – МАГНИТОСФЕРА

#### Л. Ф. Черногор

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Украина, Харьков, 61022, Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Метеороид вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2012 г. в 03:20:26 UT. Космическое тело двигалось с востока на запад (азимут составлял около 270°) под углом к горизонту около 20°. Начальная масса тела  $m_0 \approx 11$  кт, начальная скорость  $v_0 \approx 18.5$  км/с, а начальный диаметр тела  $d_0 \approx 18$  м [1 - 5]. Найденные осколки метеорита свидетельствуют о том, что космическое тело представляло собой хондрит типа LL5.

Цель настоящей работы – теоретическое и экспериментальное исследование основных физических эффектов в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ), сопутствовавших падению Челябинского космического тела.

Динамика метеороида. Движение метеороида описывается известными уравнениями торможения, потери массы, изменения угла падения, высоты и свечения тела, а также ионизации атмосферы.

В верхней части траектории каменный метеороид испытывал шелушение, а на высотах 20 – 35 км – дробление. Первоначально шароподобное тело метеороида постепенно превращалось в блинообразное тело с монотонно увеличивающимся сечением (миделем). Космическое тело разрушается при условии, что динамическое давление на него сравнивается с прочностью вещества тела. Разные части метеороида имели разную прочность:  $\sigma = 10^6 - 10^7 \text{ H/m}^2$ . Условие разрушения выполнялись на высотах 37 – 22 км, где плотность воздуха  $\rho \approx 5.8 \cdot 10^{-3} - 5.8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/m}^3$  [4, 5].

Оптическое излучение болида. Интегральная энергия излучения  $E_r$ , определенная при помощи сенсоров, установленных на геостационарных ИСЗ США, оказалась близкой к  $3.75 \cdot 10^{14}$  Дж [1, 2].

Считая, что излучение истекает от огненного шара, площадь поверхности которого близка к  $8 \cdot 10^4 \text{ м}^2$ , получим, что плотность потока равна  $3.9 \cdot 10^9 \text{ Bt/m}^2$ . Плотность потока мощности вблизи эпицентра взрыва с учетом поглощения в атмосфере близка к  $9 \cdot 10^3 \text{ Bt/m}^2$ . Она более чем на порядок превышала плотность потока света от Солнца (около 500 Bt/m<sup>2</sup>). Если бы область взрыва имела свойства абсолютного черного тела, его температура при указанных значениях плотности потока равнялась бы  $1.5 \cdot 10^4 \text{ K}$ . При этом максимум излучения приходился на длину волны около  $1.9 \cdot 10^{-7}$  м.

Зная величину  $E_r$ , можно оценить потенциальную пожароопасность метеороида. Оказалось, что вблизи эпицентра взрыва плотность потока энергии от вспышки болида близка к  $1.8 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>, а возгорание сухого вещества возникает при плотности потока (2–10)·10<sup>6</sup> Дж/м<sup>2</sup> [6].

Параметры ударной волны. Расчеты показали, что основное взрывоподобное энерговыделение имело место вблизи высоты 25 км. Считая взрыв цилиндрическим, вычисление радиуса ударной волны дало значение, равное 0.43 км. Для ударной волны цилиндрического типа в экспоненциальной атмосфере избыточное давление под эпицентром взрыва было близко к 2.4 кПа. Оказалось, что вплоть до расстояний в 100 км ударная волна оставалась достаточно сильной, чтобы вызывать частичные разрушения. При избыточном давлении в 1 кПа площадь частичных повреждений была около 6 тыс. км<sup>2</sup>.

Распространение ударной волны вверх привело к возмущению верхней атмосферы. Расчеты показали, что по мере увеличения высоты избыточное давление во фронте

ударной волны достаточно быстро уменьшалось. Относительное избыточное давление на высотах более 50 км увеличивалось.

Энергия ударной волны распространялась также в горизонтальном направлении. Так, при сферической расходимости на высоте 300 км и расстоянии 1000 км относительное избыточное давление было порядка 1. Энергия волны, однако, может каналироваться в природных атмосферных волноводах. При этом на расстоянии в 1000 км от эпицентра взрыва указанный параметр мог быть заметно больше.

Акустический эффект. Движение метеороида в атмосфере привело к генерации волн плотности в диапазоне частот от акустических до частот порядка  $10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$  Гц, соответствующих внутренним гравитационным волнам. До взрыва космического тела в энергию акустических и внутренних гравитационных волн преобразовывалось около 1 и 5 % кинетической энергии метеороида, т.е. около 1.9·10<sup>13</sup> и 9.4·10<sup>13</sup> Дж соответственно. При взрыве космического тела в энергию ударной волны перешло около 30 % кинетической энергии метеороида, т.е. около 5.6 10<sup>14</sup> Дж. На достаточно больших удалениях от места взрыва энергия ударной волны преобразовывалась в энергию акустико-гравитационных волн. Период акустических волн с наибольшей амплитудой связан с энергией источника известным соотношением [6]. Оказалось, что он близок к 21 с. Эта оценка справедлива для приземных взрывов. При взрыве на высоте в 25 км период волн примерно равен 63 с. Примерно такие периоды (около 55 с) действительно наблюдались на инфразвуковой станции в Казахстане. Дальше других (вплоть до глобальных) расстояний распространяются волны с максимальным периодом около 4.5 мин. В их энергию переходит около 10 % энергии взрыва. Как показали измерения, выполненные при помощи высокочувствительных микробарографов, инфразвуковые волны обошли три раза Земной шар.

Сейсмический эффект. При площади воздействия ударной волны в 100 км<sup>2</sup> имеем значение энергии ударной волны у поверхности Земли, равное  $10^{13}$  Дж. В энергию сейсмических волн переходит около  $10^{-5} - 10^{-4}$  энергии ударной волны от приземного взрыва [6]. При этом энергия сейсмических волн  $10^8 - 10^9$  Дж. Такому значению энергии соответствует магнитуда землетрясения, близкая к 2.1 – 2.8. Землетрясение с такой магнитудой практически не ощущаются человеком. Добавим, что сейсмические измерения дали магнитуду, равную 3.2.

Электрические эффекты могли быть вызваны частичным разделением зарядов в плазменном следе (плюме) метеороида, убеганием электронов в системе плазма следа + воздух, генерацией электродвижущей силы (ЭДС) на фронте ударной волны и возникновением электрического тока во внешнем электрическом поле Земли. Все эти механизмы проявлялись одновременно. По оценкам, потенциал электрического поля на поверхности плазменной оболочки мог достигать ~ 40 MB, напряженность электрического поля – 5 MB/м, заряд – 0.3 Кл, а сила тока в плазменном следе – 0.1 – 1 MA. Пролет тела сопровождался слабыми электрическими разрядами с энергией 1 – 10 МДж, которые вызывали электрофонный эффект. Последний наблюдался рядом жителей г. Челябинска.

**Магнитные эффекты** обусловлены «запутыванием» магнитных силовых линий в турбулентном плазменном следе (в следе индукция  $B \sim 10^{-2}$  Тл при времени турбулизации  $t_t \sim 0.01 - 0.1$  с, ЭДС  $\sim 1$  кВ, сила тока  $I \sim 1$  МА), протеканием тока в следе (плюме) метеороида (под эпицентром  $B \sim 0.1 - 1$  нТл) и модуляцией ионосферных токов акустико-гравитационными волнами, сгенерированными метеороидом ( $B \sim 1$  нТл). Механизмы генерации B за счет дипольного момента, создаваемого космическим телом, и за счет диамагнитного возмущения, вносимого ударной волной, оказались малоэффективными.

Электромагнитные эффекты могли быть связаны с резким изменением B(t) в следе (при  $B \sim 10^{-2}$  Тл имеем амплитуду электрического поля  $E \sim 1$  кВ/м), протеканием электрического тока в плазменном следе (при  $I \sim 0.1 - 1$  МА мощность электромагнитного излучения в диапазоне частот 1 - 10 кГц достигала 1 - 100 ТВт).

Излучение способно было вызвать пробой атмосферы на высотах 45 - 60 км, где поле пробоя ~  $3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^2$  В/м соответственно, нагрев электронов и возмущение концентрации электронов на границе ионосферы, образование фокусирующей линзы для радиоизлучения в широком диапазоне частиц с горизонтальным размером ~ 100 - 1000 км, а также генерацию альвеновского импульса и МГД волн. По оценкам, амплитуда альвеновского импульса составляла ~ 0.1 - 1 мВ/м.

Электромагнитные волны наряду с ударной волной и акустико-гравитационными волнами вызвали значительные (или заметные) возмущения в атмосфере и геокосмосе на удалениях ~ 100 – 1000 км от траектории метеороида. Альвеновский импульс мог наблюдаться в магнито-сопряженной области.

**Плазменные эффекты** были вызваны ионизацией следа метеороида, движущимся с высокой (около 18 км/с) скоростью тела и ударной волной, сопровождающей его падение. Показано, что линейная и объемная концентрации электронов достигали ~  $10^{26}$  м<sup>-1</sup> и  $10^{22}$  м<sup>-3</sup> соответственно. На всех высотах плазма оставалась слабоионизированной. Время релаксации  $t_N$  концентрации электронов N за счет прилипания к молекулам воздуха и рекомбинации с метеорными ионами составляло ~ 10 - 100 мс. Время релаксации температуры электронов ~ 10 - 100 нс. При  $t \le t_N$  проводимость плазмы  $\sigma_p$  от N почти не зависела и составляла ~  $10^3$  Ом<sup>-1</sup> м<sup>-1</sup>. При  $t > t_N$  значения  $\sigma_p$  быстро уменьшались пропорционально N(t).

При помощи плазменного следа (плюма) осуществлялось взаимодействие ниже лежащих слоев атмосферы с выше лежащими (ионосферой и отчасти с магнитосферой). Скорость подъема вещества в горячем следе достигала 2 – 6 км/с, время подъема – 10 – 20 с. Движение плазмы и заряженных частиц в геомагнитном поле порождало вторичные электромагнитные, МГД и плазменные эффекты (электрические токи, волны, неустойчивости и др.).

**Результаты наблюдений.** Измерения выполнены в радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Кроме того, привлекались данные сети ионозондов, магнетометров и радиоприемников сигналов спутников GPS. Ионосферные эффекты, в отличие от магнитных, были существенными. Их проявления регистрировались на расстояниях не менее 2-3 тыс. км. Экспериментально установлено, что падение метеороида сопровождалось генерацией акустических и гравитационных волн. Первые имели периоды около 2-10 мин, а вторые – 60 - 130 мин. Эти волны на расстояниях ~ 2 - 3 тыс. км приводили к регистрируемым изменениям N с относительной амплитудой порядка единиц процентов (для акустических волн) и десятков процентов (для гравитационных волн).

Наблюдения показали, что магнитный эффект Челябинского метеорита в диапазоне периодов 1 – 1000 с оказался незначительным (менее 1 нТл). В то же время *H*-компонента главного магнитного поля изменялась на 1 – 2 нТл с периодом 30 – 60 мин, длительность возмущения была около 2 ч, скорость распространения этого возмущения была близка к 300 м/с. Для сравнения укажем, что падение Тунгусского тела привело к возмущению геомагнитного поля на величину около 30 нТл длительностью 2 – 3 ч. Предложена теоретическая модель волновых возмущений геомагнитного поля. Согласно этой модели эти возмущения вызваны движением гравитационной волны, сгенерированной в атмосфере космическим телом, и возникшими при этом перемещающимися ионосферными возмущениями.

#### Выводы.

1. Построены теоретическая и эмпирическая модели основных процессов в системе ЗАИМ. Пролет и взрыв Челябинского метеороида вызвал во всех подсистемах существенные возмущения.

2. Пролет Челябинского тела сопровождался плазменными, магнитными, электрическими, электромагнитными и акустическими эффектами.

3. Избыточное давление на поверхности Земли вблизи эпицентра взрыва, имевшего место на высоте около 25 км, составило единицы килопаскалей. Это вызвало разрушения на площади около 6 тыс. км<sup>2</sup>.

4. Энергия и мощность световой вспышки составила около 375 ТДж и 313 ТВт соответственно. Энергия вспышки была на 1 – 2 порядка меньше энергии, при которой возникают пожары.

5. Энергия взрывной волны и акустических колебаний была близка к 560 и 19 ТДж.

6.Относительные возмущения давления воздуха на ионосферных высотах и концентрации электронов над эпицентром взрыва достигали сотен процентов.

7. Возмущения распространялись по горизонтали на расстояния в несколько тысяч километров.

8. Магнитуда землетрясения, вызванного космическим телом, не превышала 2-3.

9. Космические тела, подобные Челябинскому, падают на Землю с частотой один раз в 65 лет.

10. Обнаружены проявления возмущений концентрации электронов на высотах нижней ионосферы ( $z \approx 65 - 70$  км) на расстоянии от места взрыва около 1575 км, вызванные воздействием акустической волны с периодом 200 – 230 с, имеющей скорость распространения 290 – 400 м/с. Относительные возмущения концентрации электронов равнялись 2.7 – 4.6 %. Амплитуда колебаний высоты области отражения при этом составляла около 0.1 – 0.2 км. Амплитуда колебаний фазы сигнала равнялась  $4 - 7^{\circ}$ .

11. Ионозондовые наблюдения позволили обнаружить вблизи максимума слоя F2 проявления внутренних гравитационных волн, распространяющихся со скоростью 800 м/с на расстояния не менее 3000 км. Относительная амплитуда возмущений N составляла 10 – 20%. Продолжительность возмущения была около 4 – 5 ч. Значительное возмущение  $f_0F2$  (до 0.5 – 1 МГц), наблюдаемое в интервале времени с 09:00 до 16:00 на сильно удаленных друг от друга ионозондах, в принципе, могло быть вызвано пролетом и взрывом метеороида. Такое возмущение следует отнести к долгоживущим.

12. Проведенный анализ временных вариаций ПЭС вблизи от места взрыва космического тела (на расстояниях в несколько сот километров) показал наличие квазипериодических ВВ со скоростью распространения около 670 – 690 м/с, длительностью 40 – 60 мин и периодом 10 – 20 мин. Относительная амплитуда ВВ ПЭС была порядка 10 – 20 %.

13. Установлено, что пролет и взрыв Челябинского космического тела сопровождался вариациями в основном горизонтальной компоненты главного геомагнитного поля. Вариации носили квазипериодический характер с периодом 30 - 40 мин, амплитудой 0.5 - 2 нТл для  $R \approx 2.7 - 1.2$  тыс. км соответственно и продолжительностью 2 - 3 часа. Горизонтальная скорость распространения волновых возмущений геомагнитного поля была близка к 260 - 370 м/с. Эти возмущения вызваны движением гравитационной волны, сгенерированной в атмосфере падающим космическим телом, и возникшими при этом перемещающимися ионосферными возмущениями. Расчетные значения амплитуд волновых возмущений составляли 0.6 - 1.8 нТл для  $R \approx 2.7 - 1.2$  тыс. км соответственно.

14. Значительные возмущения уровня геомагнитного поля с периодами 1–1000 с не обнаружены.

Литература

1. http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs.html

2. http://neo.jpl.nasa.gov/news/firebakk\_130301.html

- 3. http://newsroom.ctbto.org/2013/02/18russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors
- 4. L. F. Chernogor. «Physical effects of Chelyabinsk meteorite in the atmosphere and geospace», Astronomy and Space Physics in Kyiv University. Book of Abstracts. Int. Conf. Kyiv, May 21 24, pp. 82 84. 2013.
- 5. L. F. Chernogor, V. T. Rozumenko. «The physical effects associated with Chelyabinsk meteorite's passage», Problems of Atomic Science and Technology, № 4 (86), pp. 136 139. 2013.
- 6.Л. Ф. Черногор. «Физика и экология катастроф», ХНУ имени В. Н. Каразина, Харьков, 2012.

СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ

## ДИНАМИКА ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ НАД ХАРЬКОВОМ В 1999–2011 гг.

#### И.Ф. Домнин, Л.Я. Емельянов, Л.Ф. Черногор

Институт ионосферы НАН и МОН Украины Украина, Харьков, 61002, ул. Краснознаменная, 16, e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com

Введение. Изучение динамических процессов в геокосмической плазме является одной из важных задач космической радиофизики и геофизики. Эти процессы в значительной степени определяют структуру области F ионосферы, существенно влияют на параметры ионосферного канала распространения радиоволн. Затмение Солнца (ЗС) является высокоэнергетическим источником. Оно приводит к существенному возмущению околоземной среды и изменению взаимодействий между подсистемами единой системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ). Полные ЗС в средних широтах происходят относительно редко. Поэтому задача исследования поведения параметров геокосмической плазмы во время солнечных затмений остается актуальной. Исследованию реакции ионосферы на воздействия ЗС посвящено значительное количество работ. Полную информацию в широком диапазоне высот получают при помощи радиофизического метода некогерентного рассеяния (НР) радиоволн [1–9].

Цель настоящей работы –изложение результатов наблюдения за динамикой плазмы в области F ионосферы во время пяти частных ЗС вблизи г. Харькова при различном состоянии космической погоды.

### Средства и методы

Радар НР. Радар расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36' с. ш., 36°18' в. д.). Основные параметры радара следующие: несущая частота – около 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – около 3700 м<sup>2</sup>, импульсная мощность радиопередающего устройства равна 2 МВт, частота следования зондирующих радиоимпульсов составляет 24.4 Гц, их длительность – 650 мкс (в 1999 г. – 800 мкс). Шумовая температура радиоприемного устройства равна 120 К, эффективная шумовая температура системы составляет 470–980 К.

Погрешность определения основных параметров ионосферы обычно не превышает 5–10 % в дневное время и 15–30 % в ночное время. В то же время погрешность определения скорости движения плазмы составляет величину около 1 м/с для высот вблизи максимума области F и 1–30 м/с для высот 200–600 км в зависимости от высоты, времени суток и состояния ионосферы.

Ионозонд. Ионозонд "БАЗИС" предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР сигнала при определении электронной концентрации методом НР. Погрешность определения критической частоты слоя F2 не хуже 0.05 МГц.

*Методика определения* вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы  $V_z$  одновременно с другими ионосферными параметрами, подробно описанная в [9], заключается в том, что скорость определяется одновременно для ряда высот ионосферы по квадратурным составляющим корреляционной функции HP сигнала.

Общие сведения о затмениях Солнца приведены в таблице. Здесь  $A_{\text{max}}$  – максимальное покрытие площади солнечного диска,  $(D/D_0)_{\text{max}}$  – максимальное покрытие диаметра солнечного диска,  $F_{10.7}$  and  $\bar{F}_{10.7}$  – индексы солнечной активности в день 3С,  $A_p$  – индекс геомагнитной активности.

Видно, что наблюдения 3С осуществлялись при отсутствии возмущений в ионосфере за исключением 31 мая 2003 г.

Дата	Начало 3С, UT	Главная фаза ЗС, UT	Конец 3С, UT	$A_{\rm max}$	$(D/D_0)_{\rm m}$ ax	$F_{10.7}$	$ar{F}_{ m 10.7}$	$A_p$
11.08.1999	09:57:32	11:15:40	12:29:27	0.746	0.794	131	158	8
31.05.2003	02:16:08	03:14:34	04:17:27	0.658	0.740	113	125	17
29.03.2006	10:02:47	11:12:59	12:21:59	0.724	0.774	82	78	6
01.08.2008	09:11:28	10:15:41	11:17:47	0.329	0.439	66	66	3
04.01.2011	07:29:39	08:58:30	10:28:36	0.708	0.781	91	82	4

Таблица. Гелиогеофизические условия наблюдений ЗС

#### Результаты наблюдений

Динамические эффекты во время ЗС впервые наблюдались на радаре Института ионосферы до высоты 1500 км 11 августа 1999 г. [1, 2] после модернизации радара НР, связанной с вводом режима измерения скорости движения плазмы.

Анализ эффектов, сопровождавших затмения Солнца 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 29 марта 2006 г., 1 августа 2008 г. и 4 января 2011 г. показал, что они качественно подобны. После покрытия диска Солнца на высотах, больших 400–500 км, скорость восходящего движения плазмы ( $V_z>0$ ) постепенно уменьшалась и становилась отрицательной. Скорость нисходящего движения плазмы ( $V_z<0$ ) увеличивалась на 10–60 м/с. Чем больше высота, тем значительней реакция  $V_z$  на 3С. Наибольшие по модулю значения  $V_z$  достигались вблизи главной фазы 3С. После этого скорость постепенно уменьшалась по модулю (изменялась в сторону положительных значений) и достигала своего дневного значения. Иначе говоря, каждое затмение сначала вызывало переходные процессы, подобные тем, которые имеют место в вечернее время, а затем процессы, свойственные утреннему времени. Отличие состояло лишь в том, что такие переходы от «светлого» времени к «темному» и наоборот длились около 1 часа. В вечернее и утреннее время аналогичные процессы имеют длительность по несколько часов.

Однако в вариациях параметров среды во время сходных по своим характеристикам ЗС имели место количественные различия. Эти различия были вызваны общим состоянием геокосмоса на разных фазах цикла солнечной активности. Это подтверждает, что каждое ЗС обладает своими индивидуальными особенностями.

На рисунках 1–4 представлены отдельные результаты измерения высотных и временных вариаций параметров ионосферы во время 3С.



Рис.1. Временные вариации вертикальной скорости плазмы в день затмения 11 августа 1999 г. и контрольный день (пунктир) на высотах 350, 500, 650 км. Стрелками обозначены моменты захода Солнца в Харькове и магнитосопряжённой точке (тонкая)



Рис. 2. Высотные зависимости вертикальной составляющей скорости движения плазмы для различных временных интервалов (усреднение по 15 мин). Время UT. Штриховой линией показана высотная зависимость вертикальной составляющей скорости для вечернего времени (20:00 UT) 18 августа 2008 г.







Рис.4. Высотные профили V<sub>z</sub> в характерные моменты времени: в начале (*a*), в главной фазе (*б*), после окончания 3С (*в*), – и ночью (*г*) 4 января 2011 г. (сплошные линии), а также в соответствующие моменты в контрольные дни 5 января 2011 г. (точки) и 22 декабря 2010 г. (пунктир)

Изменения вертикальной составляющей скорости и потоков плазмы свидетельствуют о значительном отличии процессов обмена плазмой между ионосферой и протоносферой в условиях затмения от обычного состояния.

#### Литература

- 1. V. I. Taran, V. K. Bogovsky, V. N. Lysenko, Ye. I. Grigorenko, L. Ya. Emelyanov, "Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar", Космічна наука і технологія, Space Plasma physics (Додаток до журналу), Т. 7, № 2, сс. 36–41, 2001.
- 2. Л. А. Акимов, Е. И. Григоренко, В. И. Таран, О. Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор, «Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 г.», Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники, № 2, сс. 25–63, 2002.
- 3. L. Ya Yemelyanov and D. A. Dzyubanov, "The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination", Telecommunications Radio Engineering, V. 66, No 14, pp. 1313–1327, 2007.
- 4. В. П. Бурмака, Е. И. Григоренко, Л. Я. Емельянов, В. Н. Лысенко, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор, «Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г.», Успехи современной радиоэлектроники, № 3, сс. 38–53, 2007.
- 5. Д. А. Дзюбанов, Л. Я. Емельянов, Л. Ф. Черногор, «Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г.», Космічна наука і технологія, Т. 15, № 3, сс. 62-69, 2009.
- 6. Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор, «Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений», Космічна наука і технологія, Т. 15, № 3, сс. 70–81, 2009.

- I. F. Domnin, L. Ya. Yemel'yanov, D. V. Kotov, M. V. Lyashenko, and L. F. Chernogor, "Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov:1. Results of Incoherent Scatter Observations", Geomagnetism and Aeronomy, V. 53, No 1, pp. 113–123, 2013.
- 8. Л. Я. Емельянов, Л. Ф. Черногор, «Динамика плазмы в ионосферном канале распространения радиоволн», В сб. докладов: XXIII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, 23–26 мая 2011 г., Т 1, сс. 338-341, 2011.
- 9. I. F. Domnin, L. Ya. Yemel'yanov, and L. F. Chernogor, "Dinamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse", Radio Physics and Radio Astronomy, V. 3, No 4, pp. 311–321, 2012.

## ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ КАК ИНДИКАТОР ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**А.А. Намгаладзе, М.И. Карпов** Мурманский государственный технический университет Россия, Мурманск, 183010, namgaladze@yandex.ru

Под полным электронным содержанием (ПЭС) ионосферы понимают общее количество электронов в столбе единичного сечения (интеграл по высоте от электронной концентрации), оно определяется электронной концентрацией в максимуме F2-слоя ионосферы. ПЭС измеряют по изменениям фазы электромагнитных сигналов, распространяющихся через ионосферу от спутника к наземному приемнику, т.е. по времени прохождения сигнала вдоль траектории спутник-приемник (величина задержки пропорциональна полному электронному содержанию) [1]. В настоящее время для измерений ПЭС используются глобальные спутниковые системы GPS и хорошее ГЛОНАСС, густая сеть приёмников этих систем обеспечивает пространственное разрешение и приемлемую погрешность глобальных двухчасовых карт ПЭС [2].

Исследования ПЭС для мониторинга состояния ионосферы ведутся уже давно, и в последние годы были выявлены стабильные долгоживущие возмущения (отклонения от средних значений) над сейсмически активными областями, трактуемые как ионосферные предвестники землетрясений [3-6]. Величина наблюлаемых положительных и/или отрицательных возмущений (увеличений и уменьшений ПЭС) достигает нескольких десятков процентов. Форма области проявления аномалий не изменяется в течение 4-8 часов и более, ее размеры составляют до 1500 км вдоль меридиана и 3500-4000 км вдоль параллели. Заметные (более 20%) относительные возмущения ПЭС наблюдаются преимущественно в ночное время, с восходом Солнца происходит значительное ослабление возмущений вплоть до их полного исчезновения и восстановление после захода Солнца. В отличие от возмущений, связанных с геомагнитной активностью, данные аномалии не перемещаются от источника и "привязаны" к области эпицентра землетрясения. Для низкоширотных землетрясений наблюдаются модификации экваториальной аномалии в виде заполнения или углубления провала в электронной концентрации над экватором. Похожие эффекты наблюдаются также в окрестности точки, магнитно-сопряженной к эпицентру землетрясения (рис. 1).

Ясно, формирования наблюдаемых возмущений что для необходим локализованный источник, в качестве которого рассматривается электрическое поле сейсмического происхождения [4, 7–9], образованное над областью эпицентра и передаваемое вверх и далее в противоположное полушарие вдоль идеально проводящих геомагнитных силовых линий. Воздействие электрического поля на ПЭС заключается в электромагнитном  $[E \times B]$  дрейфе плазмы F2-слоя ионосферы. Дрейф, создаваемый восточным электрическим полем, движет плазму поперёк магнитного поля вверх в области с меньшей концентрацией нейтральных молекул, т.е. с меньшими скоростями потерь ионов O<sup>+</sup>, которые доминируют в области максимума F2-слоя, в ионно-молекулярных реакциях, что приводит к увеличению NmF2 и, соответственно, к увеличению ПЭС. Дрейф плазмы вниз под действием западного электрического поля приводит к большим потерям ионов O<sup>+</sup>, т.е. к обратному эффекту в NmF2 и уменьшению ПЭС [7]. Меридиональная и зональная компоненты дрейфа перераспределяют плазму в горизонтальной плоскости [10].



Рис. 1. Относительные возмущения ПЭС (%), наблюдаемые перед землетрясением в Гаити 12.01.2010 г. Звездой обозначен эпицентр землетрясения, ромбом – магнитносопряженная точка, черной линией – линия терминатора. Временные метки соответствуют местному времени в эпицентре [6].

Возмущенные электрические поля действительно наблюдаются над сейсмически активными областями, и согласно измерениям со спутников «Intercosmos Bulgaria 1300» и DEMETER величины напряженности составляют 5–10 мВ/м при горизонтальных масштабах от нескольких сотен до тысячи километров [11–12].

Формирование сейсмогенных электрических полей в ионосфере связывают со сторонним электрическим током [4, 8, 9], текущим над эпицентром и обусловленным ионизацией молекул воздуха в приземном слое атмосферы. Источником ионизации являются продукты распада радона и других радиоактивных газов, эманирующих из тектонического разлома, а также мощные электрические поля, генерируемые у поверхности при сдавливании тектонических плит и накоплении положительных носителей зарядов при разрыве пероксидных связей в кристаллической решетке породы [13]. Образованные в результате ионизации заряженные частицы налипают на пыль, капли воды и аэрозоли, выбрасываемые из разлома в атмосферу, и переносятся вверх на ионосферные высоты под действием конвекционного переноса аэрозолей различного размера и массы. Расчеты, выполненные в работе [8], показывают, что для формирования в ионосфере электрических полей порядка нескольких мВ/м требуется сторонний электрический ток плотностью  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  А/м<sup>2</sup> через площадь радиусом 200 км.

Численные расчеты возмущений ПЭС были выполнены в работах [6, 7, 10, 14] с использованием глобальной численной модели верхней атмосферы Земли (Upper Atmosphere Model, сокр. UAM). Источники электрического тока плотностью 10-20 нА/м2 задавались в качестве входных параметров на нижней границе (на высоте 80 км) в уравнении электрического потенциала на площади размерами 250 км вдоль геомагнитного меридиана и 2500-4500 км вдоль параллели. Их действие приводило к формированию электрических полей напряженностью порядка нескольких мВ/м над эпицентром и в магнитно-сопряженной области, аналогичных наблюдаемым со спутников перед крупными землетрясениями. Модельные возмущения ПЭС, создаваемые электромагнитным дрейфом под действием таких полей, обладали всеми характерными особенностями ионосферных предвестников, перечисленными выше (рис. 2). Сторонний электрический ток приводил также к генерации в нейтральной атмосфере внутренних гравитационных волн, перемещающихся от источника, однако вклад ВГВ в формирование возмущений ПЭС был малым по сравнению с действием электромагнитного дрейфа.



Рис. 2. Рассчитанные возмущения ПЭС (%) относительно спокойных условий для землетрясения в Гаити 12.01.2010 г. Звездой обозначено положение источников стороннего тока [6].

Похожие расчеты были выполнены в работе [15] с использованием модели SAMI2 и было показано, что для формирования ночных возмущений ПЭС порядка 30% относительно спокойных условий требуется электрический ток плотностью 1 мкА/м<sup>2</sup> через площадь 20×300 км. Учитывая меньшую площадь, эта величина согласуется с результатами расчетов по модели UAM.

Таким образом, возмущения ПЭС, наблюдаемые перед сильными землетрясениями, создаются электромагнитным дрейфом плазмы F2-слоя ионосферы под действием сейсмогенного электрического поля, равного нескольким мВ/м и формируемого сторонним электрическим током, текущим над областью эпицентра. Модельные расчеты вариаций ПЭС показывают, что плотность тока должна быть не менее 1–10 нА/м<sup>2</sup>. Отсутствие прямых измерений вертикальных токов над областями готовящихся землетрясений не позволяет определить истинные величины плотности тока, однако значения, использованные в модельных расчетах, согласуются с результатами измерений грозовых токов [16–17] и не превышают оценок в работе [9], результатов измерений токов через стволы деревьев [18] и при сдавливании образцов горных пород в лабораторных экспериментах [13]. Таким образом, наряду с грозовыми токами сейсмогенные электрические токи являются важным элементом глобальной электрической цепи.

## Литература

- 1. B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, «Global Positioning System: Theory and Practice», Springer, Wien, 2001.
- 2. J.M. Dow, R.E. Neilan, C. Rizos, «The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems», Journal of Geodesy, V. 83, № 3–4, pp.191–198, 2009. doi:10.1007/s00190-008-0300-3, 2009.
- 3. J.Y. Liu, Y.I. Chen, Y.J. Chuo, C.S. Chen, «A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly», Journal of Geophysical Research, V. 111, № A05304, pp. 1–5, 2006. doi:10.1029/2005JA011333
- 4. S. Pulinets, K. Boyarchuk, «Ionospheric Precursors of Earthquakes», Springer, Wien, 2004.
- 5. I.E. Zakharenkova, I.I. Shagimuratov, N.Y. Tepenitzina, A. Krankowski, «Anomalous Modification of the Ionospheric Total Electron Content Prior to the 26 September 2005 Peru Earthquake», Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 70, № 15, pp. 1919–1928, 2008. doi:10.1016/j.jastp.2008.06.003
- A.A. Namgaladze, M. Förster, B.E. Prokhorov, O.V. Zolotov, «Electro-magnetic Drivers in the Upper Atmosphere: Observations and Modeling», In: The Atmosphere and Ionosphere. Physics of Earth and Space Environments. Ed. V. Bychkov, G. Golubkov, A. Nikitin, Springer, pp. 165–219, 2013. doi:10.1007/978-94-007-2914-8\_4

- 7. A.A. Namgaladze, M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, I.E. Zakharenkova, «Physical Mechanism and Mathematical Modeling of Earthquake Ionospheric Precursors Registered in Total Electron Content», Geomagnetism and Aeronomy, V. 49, № 2, pp. 252–262, 2009. doi: 10.1134/S0016793209020169
- V.M. Sorokin, A.K. Yaschenko, M. Hayakawa, «A perturbation of DC electric field caused by light ion adhesion to aerosols during the growth in seismic-related atmospheric radioactivity», Natural Hazards and Earth System Sciences, V. 7, pp. 155–163, 2007. doi:10.5194/nhess-7-155-2007
- 9. R.G. Harrison, K.L. Aplin, M.J. Rycroft, «Atmospheric electricity coupling between earthquake regions and the ionosphere», Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 72, № 5–6, pp. 376–381, 2010. doi: 10.1016/j.jastp.2009.12.004
- 10. M.I. Karpov, A.A. Namgaladze, O.V. Zolotov, «Modeling of Total Electron Content Disturbances Caused by Electric Currents between the Earth and the Ionosphere», Russian Journal of Physical Chemistry B, V. 7, № 5, pp. 594–598, 2013. doi:10.1134/S1990793113050187
- M. Gousheva, D. Danov, P. Hristov, M. Matova, «Ionospheric quasi-static electric field anomalies during seismic activity in August-September 1981»,/ Natural Hazards and Earth System Sciences, V. 9, pp. 3–15, 2009. doi:10.5194/nhess-9-3-2009
- X. Zhang, X. Shen, S. Zhao, L. Yao, X. Ouyang, J. Qian, «The characteristics of quasistatic electric field perturbations observed by DEMETER satellite before large earthquakes», Journal of Asian Earth Sciences, V. 79(A), pp. 42–52, 2013 doi:10.1016/j.jseaes.2013.08.026
- F. Freund, I.G. Kulahci, G. Cyr, J. Ling, M. Winnick, J. Tregloan-Reed, M. Freund, «Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals», Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V. 71, pp. 1824–1834, 2009. doi:10.1016/j.jastp.2009.07.013
- 14. A.A. Namgaladze, O.V. Zolotov, B.E. Prokhorov, «Numerical Simulation of the Variations in the total Electron Content of the Ionosphere Observed before the Haiti Earthquake of January 12, 2010», Geomagnetism and Aeronomy, V. 53, № 4, pp.522–528, 2013. doi:10.1134/S0016783213030122
- 15. C.L. Kuo, J.D. Huba, G. Joyce, L.C. Lee, «Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges», Journal of Geophysical Research, V. 116, № A10317, pp. 1–10, 2011. doi:10.1029/2011JA016628
- 16. R.J. Blakeslee, H.J. Christian, B. Vonnegut, «Electrical Measurements Over Thunderstorms», Journal of Geophysical Research, V. 94, № 13, pp. 13135–13140, 1989. doi:10.1029/JA090iA10p09824
- E.P. Krider, J.A. Musser, «Maxwell currents under thunderstorms», Journal of Geophysical Research, V. 87, № C13, pp. 11171–11176, 1982. doi:10.1029/ JC087iC13p11171
- J. Le Mouel, D. Gibert, J. Poirier, «On transient electric potential variations in a standing tree and atmospheric electricity», Comptes Rendus Geoscience, V. 342, № 2, pp. 95–99, 2010. doi:10.1016/j.crte.2009.12.001
- 19. A.A. Namgaladze, «Earthquakes and Global Electrical Circuit», Russian Journal of Physical Chemistry B, V. 7, № 5, pp. 589–593, 2013. doi:10.1134/S1990793113050229

## УЧЕТ ИОНОСФЕРНОЙ ОШИБКИ ВТОРОГО ПОРЯДКА И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ В ДВУХЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

## **Е.В. Конецкая**<sup>1</sup>, **М.В. Тинин**<sup>2</sup>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет» ФГБОУ ВПО «ИГУ», Физический факультет Адрес: Россия, Иркутск, б-р Гагарина, 20, 664003

<sup>1</sup> cpb7.12.2010@gmail.com

<sup>2</sup> mtinin@api.isu.ru

#### Введение

Необходимость учета ионосферных ошибок высших порядков обусловлена высокими требованиями к точности определения координат приемника – порядка миллиметров. Существующие высокоточные методики устранения ионосферной ошибки являются разностными (относительными), базируются на использовании как минимум двух двухчастотных приемников, либо – на использовании референцных базовых станций с известными координатами. Однако недостатками такого способа определения координат является потребность в нескольких дорогостоящих приемниках одновременно, отсутствие базовых станций в некоторых местах, а также задержка и точностью, получения файлов с информацией которую обеспечивают международные сервисные центры обработки данных ГНСС наблюдений.

В работе предложена методика введения эффективных частот для учета эффектов магнитного поля в ионосферной ошибке второго порядка. Реализация ее выполнена для абсолютного способа определения координат, когда координат приемника определяются по измерениям одного этого приемника. Выполнено моделирование и показана состоятельность предложенной методики. Также реализована обработка экспериментальных данных со станций и показаны возможности учета ионосферных ошибок второго порядка в реальных условиях.

## 1. Ионосферная ошибка второго порядка и устранение ее в двухчастотных измерениях

Важной особенностью фазовых ГНСС измерений является то, что на высоких частотах измеряемая ионосферная составляющая фазовой дальности в рамках приближения геометрической оптики имеет простую частотную зависимость [1, 2]:

$$\varphi = \int n \, dz = D - 40.3 I_1 / f^2 - 40.3 I_2 / f^3 + O(f^{-4}), \tag{1}$$

где  $I_1 = \int_{z_0}^{z_t} N(z')dz'$  - полное электронное содержание;  $I_2 = \int_{z_0}^{z_t} N(z')\cos\theta(z')dz'$ ; N -

электронная концентрация; f - рабочая частота;  $\theta$  - угол между  $B_0$  и направлением распространения волны; dz - элемент траектории, вдоль которой сигнал ГНСС распространяется, при этом предполагается, что траектория – прямая, координата спутника -  $z_1$ , приемника -  $z_0$ . Первое слагаемое в (1) – истинная дальность между спутником и приемником, второе слагаемое - ионосферная ошибка первого порядка, отражающая изменение фазовой скорости в ионосфере, третье слагаемое - ионосферная ошибка второго порядка  $D_2 = 40.3I_2/f^3$ , связанная с наличием влияния на ионосферную плазму магнитного поля.

В стандартных двухчастотных фазовых измерениях предполагается, что существенный вклад в величину фазовой дальности вносит только ионосферная

ошибка первого порядка, а остальные слагаемые – малы:  $\varphi = D - 40.3 I_1 / f^2$ . Ионосферная ошибка первого порядка в этом предположении устраняется при использовании измерении фазовой псевдодальности на двух частотах  $f_1$  и  $f_2$ :

$$\begin{cases} \varphi_1 = D - 40.3I_1/f_1^2, \\ \varphi_2 = D - 40.3I_2/f_2^2. \end{cases}$$
(2)

Применение без-ионосферной комбинации позволяет определить уточненное значение истинной дальности между спутником и приемником, не содержащую ионосферной ошибки:

$$D^{(2)} = \left(\varphi_1 f_1^2 - \varphi_2 f_2^2\right) \left(f_1^2 - f_2^2\right)^{-1}.$$
(3)

Точность, достигаемая с помощью такого подхода составляет несколько десятков сантиметров – метры [3 – 5], однако она недостаточно высока. Для повышения точности можно учитывать, и соответственно - устранять ионосферную ошибку второго порядка. Выражение для фазовой дальности с учетом эффектов магнитного поля в приближении ГО записывается следующим образом:

$$\varphi = D - 40.3I_1 / f^2 - 40.3I_2 / f^3.$$
(4)

В рамках приближения тонкого слоя [6, 7] отмечена зависимость величины интеграла  $I_2$  от полного электронного содержания  $I_1$ :

$$I_2 \approx I_{2 np} = C_H I_1 \tag{5}$$

где коэффициент  $C_H = f_g(z_m) \cos \theta(z_m)$  вычисляется обычно в точке пресечения луча спутник – наблюдатель с максимумом ионосферного слоя. Здесь  $f_g = |eB_0|(2\pi m)^{-1}$ , *е* и *m* - гирочастота, заряд и масса покоя электрона, соответственно;  $B_0$  - магнитное поле Земли. В работах [7], [8] были показаны возможность использования и область применения данного приближения.

Использование в выражении (4) зависимости (5) приводит к следующему выражению для фазовой псевдодальности для различных рабочих частот:

$$\varphi_i = D - 40.3I_1/f_i^2 - 40.3I_2/f_i^3 = D - 40.3I_1(1 - C_H/f_i)/f_i^2$$

Упрощение выражения  $(1-C_H/f_i)/f_i^2$ , с учетом малости величины  $C_H$  по сравнению со значениями рабочих частот, приводит к следующему результату:

$$f_i^{-2} \left( 1 - C_H / f_i \right) = f_i^{-2} \left( 1 - 2 \cdot C_H / (2 \cdot f_i) \right) \approx f_i^{-2} \left( 1 - C_H / (2f_i) \right)^{-2} = \left( f_i^2 - C_H / 2 \right)^{-2} = f_{i\_ef}^{-2}, \tag{6}$$

где  $f_{i_{ef}} = f_i - 0.5C_H$ . После введения эффективной частоты (6) выражение (4) примет вид:

$$\varphi = D - 40.3I_1 / f_{ef}^{2} , \qquad (7)$$

и тогда т.н. без-ионосферная комбинация (3), учитывающая в двухчастотном приеме только ионосферные ошибки первого порядка, учтет эффекты магнитного поля:

$$D_{M}^{(2)} = \left(\varphi_{1}f_{1\_eff}^{2} - \varphi_{2}f_{2\_eff}^{2}\right) \left(f_{1\_eff}^{2} - f_{2\_eff}^{2}\right)^{-1}.$$
8)

Таким образом, использование модифицированного двухчастотного метода устраняет ионосферную ошибку второго порядка.

#### 2. Моделирование

Для определения степени эффективности предложенной методики (8) учета ионосферной ошибки второго порядка будем рассчитывать скорректированную остаточную ошибку, которую определим как разность между скорректированной дальностью (8) и истинным расстоянием между объектами спутник – приемник:

$$\Delta_M = D_M^{(2)} - D \,. \tag{9}$$



Рис.1. а) Широтно – долготное распределение (в мм) остаточной ошибки для спутника с углом возвышения 10° и азимута 135° б) Зависимость остаточной ошибки от угла возвышения спутника после стандартной двухчастотной обработки (линия 1), и ее модификации (линия 2). Азимут спутника взят 180°. Координаты приемника равны 0° с.ш., 0° в.д.

Вычисление погрешности (9) методики (8) выполнялось с использованием следующих моделей ионосферы и магнитного поля: слой Чепмена и модель магнитного поля IGRF. Параметры слоя ионосферы, описываемого выражением  $N(h) = f_{xp}^2 \exp\left\{0.5\left[1-\zeta-\exp(-\zeta)\right]\right\}/80.6$ , где  $\zeta = (h-h_0)/H$ , были взяты следующими: критическая частота  $f_{xp} = 15$  МГц; высота максимума слоя  $h_0 = 320$  км; характерный масштаб слоя H = 70 км. При этом вертикальное ПЭС составляет 80 ТЕСU(1 ТЕСU= $10^{16}$  м<sup>-2</sup>).

Из рис. 1 видно, что ионосферная ошибка второго порядка в большинстве случае устраняется на 99%, при этом величина остаточной ошибки по модулю после коррекции не превышает 0,5 мм. Для территорий, расположенных в Южном полушарии и имеющих долготы от 1 до 80 град. в.д., остаточная ошибка превышает 0,4 – 0,6 мм. На остальных территориях величина остаточной ошибки не превышает 0,3 мм. Также стоит отметить смещение величин остаточной ошибки в южном направлении.

#### 3. Обработка экспериментальных данных

При анализе экспериментальных данных использовались данные с группы станций MINPROM, ITMO, TUKL. Отбор данных производился в дни, когда индекс К<sub>Р</sub> имел значения 0 – 4. Анализировались ряды фазовых измерений длительностью 1 час с 30-тисекундным интервалом. После устранения погрешностей не ионосферного происхождения (фазовая неоднозначность, ошибки эфемерид, ошибки часов и т.д.) полученные псевдодальности обрабатывались с использованием стандартного и модифицированного двухчастотного методов для получения расстояния от спутника до приемника  $D^{(2)}$  и  $D_{M}^{(2)}$ . Используя эти данные, решалась навигационная задача, были  $x_{i}^{(2)}$ (стандартная двухчастотная получены координаты обработка) И  $x_{iM}^{(2)}$ Для сравнения (модифицированная обработка). вычислялась разность между полученными координатами  $\Delta = x_i^{(2)} - x_{iM}^{(2)}$  (табл. 1)

	MINPROM		ITM	10	TUKL		
$K_{P}$	Плановые	Высотное	Плановые	Высотное	Плановые	Высотное	
	координаты	положение	координаты	положение	координаты	положение	
0	8	6		3			
1	4	5		6			
2	6	5		4			
3	7	3		2			
4	5	4		3			

Таблица 1. Сравнение точности определения координат при использовании стандартного и модифицированного двухчастотного метода  $\Delta = x_i^{(2)} - x_{iM}^{(2)}$ , мм

Из таблицы видно, что точность при определении координат при увеличении индекса *К<sub>p</sub>* уменьшается, что объясняется использованием модели магнитного поля, не предусматривающей. Однако видно, что точность определения координат – повышается.

#### Заключение

В работе предложен способ учета ионосферной ошибки второго порядка. Для проверки метода были проведены моделирование и обработка экспериментальных данных по предложенной методике. Показаны состоятельность методики и величины поправок при уточнении координат приемника.

#### Литература

- 1. В. Л. Гинзбург «Распространение электромагнитных волн в плазме», Наука, Москва, 1967.
- 2. Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов «Геометрическая оптика неоднородных сред», Наука, Москва, 1980.
- 3. R. Prasad, M. Ruggieri «Applied satellite navigation using GPS, GALILEO, and Augmentation Systems», London, Artech House, 2005.
- 4. G.Xu «GPS Theory, algorithms and applications», New York, Springer, 2007.
- 5. M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews «Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration», New York, Wiley, 2007.
- 6. S. Bassiri, G.A. Hajj «Higer order ionospheric effects on global positioning system observables and means of modeling them», Manuscr. Geodaet, N 18, P. 280 289, 1993.
- 7. М.В. Тинин, Е.В. Конецкая «Влияние геомагнитного поля на ионосферную ошибку спутниковых навигационных систем», Геомагнетизм и аэрономия, 2013.
- 8. M.M. Hoque, N. Jakowski «Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning»/ Radio Science, V. 43. N 5, 2007. doi: 10.1029/2007RS003817.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ СТАРТЫ И ПОЛЁТЫ МОЩНЫХ РАКЕТ

## **В. Т. Розуменко<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>1</sup>, В. П. Бурмака<sup>2</sup>** <sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Украина, Харьков, 61022, <u>Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua</u> <sup>2</sup>Институт ионосферы НАНУ и МОНУ Украина, Харьков, 61002,

**Введение.** Исследованию физических процессов, вызванных стартами ракет (СР) и полётами космических аппаратов (КА), посвящено большое количество работ (см., например, [1]). Как правило, публикации посвящены описанию эффектов, регистрируемых вдоль активного участка траектории ракеты. Отличительной особенностью наших работ является исследование физических процессов в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ), вызванных удалёнными на ~1 – 10 тыс. км СР [2, 3]. Проанализированы эффекты примерно 5 тыс. СР, среди которых были и аварийные (З1 событие), а также посадки КА типа Space Shuttle (54 события) и падений орбитальных станций (4 события).

**Основные процессы.** В ходе исследований установлено, что СР и полёты КА сопровождаются тепловым, динамическим, химическим, акустическим и электромагнитным воздействиями на подсистемы системы ЗАИМ. В результате такого воздействия в системе возникает целый комплекс физических, химических, оптических и других процессов. Схема, иллюстрирующая основные процессы в системе ЗАИМ, приведена на рис. 1. Видно, что СР и полёты КА сопровождаются возмущениями геофизических полей, атмосферно-ионосферного канала связи, изменениями условий распространения радиоволн различных диапазонов и вариациями их характеристик.

Для диагностики возмущений использовался арсенал радиофизических, оптических, магнитометрических и других методов. Средства диагностики размещены в Радиофизической обсерватории (РФО) Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (49° 38' N, 36° 20'E).

Диагностика возмущений при помощи метода частичных отражений (ЧО) [2-4]. Метод эффективен для обнаружения возмущений на высотах  $z \approx 50 - 100$  км. Эффекты, сопровождающие СР, существенно зависели от времени суток, состояния нижней ионосферы и космический погоды. Их можно разделить на две группы: апериодические и квазипериодические. Апериодические всплески интенсивности ЧО сигналов возникали в нижней ионосфере (чаще на высотах 80 - 90 км) со временем запаздывания  $\Delta t_1 \approx 3 - 10$  мин, причём  $\Delta t_1$  почти не зависело от расстояния между космодромом и РФО. Длительность всплесков составляла  $\sim 1 - 10$  мин. Причиной появления таких всплесков, скорее всего, является высыпание электронов из магнитосферы с энергией  $\sim 10 - 10^2$  кэВ и плотностью потока  $10^7 - 10^9$  м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Квазипериодические возмущения имели кажущиеся скорости распространения  $v \approx 0.3$  км с<sup>-1</sup> и период  $T \approx 10 - 20$  мин. Такие параметры свойственны акустикогравитационным волнам (АГВ).

Диагностика возмущений при помощи метода доплеровского зондирования [2, 5 – 10]. Доплеровский ВЧ радар применяется для исследования средней ионосферы путём стробирования по высоте в диапазоне 100 – 400 км. СР сопровождались генерацией (усилением, реже ослаблением) волновых возмущений (ВВ) в ионосфере. Скорость  $v \approx 0.3 - 0.7$  км с<sup>-1</sup> на высоте  $z \approx 100 - 300$  км, период волн  $T \approx 15 - 30$  мин, продолжительность цуга — 1 – 2 ч. ВВ сопровождались деформацией доплеровских

ежеминутных спектров, их "рассыпанием", появлением дополнительных мод и наклонных отражений. Перенос возмущений осуществлялся при помощи АГВ, которые приводили к модуляции концентрации электронов N с относительной амплитудой  $\delta_N \approx 1 - 10\%$ . Реже наблюдались BB с v около 1 и 0.3 – 0.7 км с<sup>-1</sup>, которые связаны с генерацией медленных МГД (ММГД) волн.

Диагностика возмущений при помощи метода вертикального зондирования (см., например, [11 – 13]). Данный метод применяется также для изучения средней ионосферы. СР сопровождались квазипериодическими вариациями  $f_0$ E и  $f_{0,x}$ F2 с периодом  $T \approx 10 - 30$  мин, продолжительностью  $\Delta T \approx 1 - 2$  ч и относительной амплитудой около 1 – 10%. Скорость ВВ составляла 0.3 – 0. 4 км с<sup>-1</sup> для  $f_0$ E и 0.5 – 06 (иногда ~0.9 – 1.1) км с<sup>-1</sup> для  $f_{0,x}$ F2. Эпизодически СР сопровождался появлением спорадического слоя E, наклонных отражений в F-области ионосферы и диффузностью ионограмм по частоте и высоте.

Диагностика возмущений при помощи метода некогерентного рассеяния (*HP*) [2, 8, 9, 14 – 18]. Результаты исследования этим методом не только подтвердили результаты, полученные другими методами, но и позволили получить новые сведения о характере BB в широком диапазоне высот (100 – 600 км). Установлено, что максимальные значения  $\delta_N$  имеют место на высотах 200 – 300 км. Показано, что, кроме BB *N*, возникают квазипериодические вариации температур электронов и ионов с относительной амплитудой ~1 – 10%. Методом HP наблюдались BB со скоростями 0.4 – 0.7 (иногда ~1) и 2 – 3 км с<sup>-1</sup>, периодами  $T \approx 20 - 60$  мин и  $\Delta T \approx 1 - 3$  ч.



Рис. 1. Основные процессы в системе ЗАИМ при СР и полётах КА.

Геомагнитные эффекты стартов ракет [2, 19 – 24]. Проанализированы временные вариации уровня геомагнитных пульсаций в диапазоне 1 – 1000 с, которые сопровождали СР и полёты КА разных типов с различных космодромов мира в 2002 – 2013 гг. (всего 264 события). Удаления от космодромов составляло 1500 – 9500 км. Проведено спектральное оценивание преобладающих периодов BB (6 – 14 мин) и амплитуд спектральных составляющих (1 – 3 нТл), а также статистический анализ. Выявлено три группы скоростей: около 0.6, 1.1 и 2.3 км с<sup>-1</sup>. Продолжительность BB изменялась от 20 – 30 до 60 – 70 мин при увеличении дальности *R* от 1500 до 9500 км.

**Выводы.** На основе наблюдений за период 1970 – 2013 гг. нами экспериментально установлено и теоретически объяснено неизвестное ранее явление возникновения апериодических и квазипериодических глобальных возмущений в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ), вызванных стартами ракет и полётами космических аппаратов; определены механизмы взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ и типы волн, ответственные за перенос возмущений.

### Литература

- 1. "Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду", под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова, АНКИЛ, М., 2000.
- 2. Л. Ф. Черногор, "Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет", XHУ имени В. Н. Каразина, Харьков. 2009.
- 3. L. F. Chernogor, N. Blaunstein, Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment, Taylor and Francis Group, New York, 2013.
- K. P. Garmash, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor, "Global Ionospheric Disturbances Caused by a Rocket Launch against a Background of a Magnetic Storm", Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 39, No 1, pp. 69 75, 1999.
- 5. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор, "Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 4, № 3, с. 227 246, 1999.
- V. P. Burmaka, L. S. Kostrov, L. F. Chernogor, "Statistics of Signals of the HF Doppler Radar Sensing the Bottomside Ionosphere Disturbed by Rocket Launches and Solar Terminator", Telecommunications and Radio Engineering, Vol. 61, No 2 – 6, pp. 150 – 177, 2004.
- 7. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор, "Доплеровское радиозондирование возмущений в Е- и F-областях ионосферы при стартах и полетах космических аппаратов", Космічна наука і технологія. ДОДАТОК, Т. 9, № 2, с. 132 143, 2003.
- В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор, "Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 9, № 1, с. 5 – 28, 2004.
- 9. V. P. Burmaka, V. I. Taran, L. F. Chernogor, "Ionospheric Wave Disturbances Accompanied by Rocket Launches against a Background of Natural Transient Processes", Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 44, No 4, pp. 476 491, 2004.
- 10. Л. Ф. Черногор, "Эффекты в геокосмосе, сопутствовавшие стартам группы ракет", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 13, № 1, с. 39 53, 2008.
- Т. Г. Живолуп, Л. Ф. Черногор, "Ионосферные эффекты в течение полета ракеты "Протон": результаты вертикального зондирования", Космічна наука і технологія, Т. 16, № 3, с. 25 – 31, 2010.
- 12. Т. Г. Живолуп, Л. Ф. Черногор, "Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты "Союз" в спокойных и магнитовозмущенных условиях", Космічна наука і технологія, Т. 16, № 3, с. 32 41, 2010.
- 13. Л. Ф. Черногор, Т. Г. Живолуп, "Сравнительный анализ ионосферных эффектов в течение полетов ракеты "Протон" при различных состояниях космической погоды", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 16, № 4, с. 394 – 403, 2011.
- 14. В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор, "Радарные наблюдения волновых процессов в ионосфере, сопутствовавших полетам космических аппаратов", Космічна наука і технологія, Т. 10, № 5/6, с. 113 117, 2004.

- 15. В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор, Ю. В. Черняк, "Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет "Союз" и "Протон"", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 10, № 3, с. 254 272, 2005.
- V. P. Burmaka, Lysenko V. N., L. F. Chernogor, and Yu. V. Chernyak, "Wave-Like Processes in the Ionospheric F Region That Accompanied Rocket Launches from the Baikonur Site", Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 46, No 6, pp. 742 – 759, 2006.
- 17. В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор, "Комплексная диагностика ионосферной плазмы, возмущенной удаленными стартами ракет", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 14, № 1, с. 26 44, 2009.
- V. P. Burmaka, L. F. Chernogor, "Complex Diagnostics of Disturbances in the Ionospheric Plasma Parameters Far from the Trajectories of Launched Rockets", Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 49, No 5, pp. 637 – 652, 2009.
- 19. К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов", Космічна наука і технологія, Т. 13, № 6, с. 87 98, 2007.
- 20. Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк", Космічна наука і технологія, Т. 14, № 3, с. 29 38, 2008.
- 21. Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР", Космічна наука і технологія, Т. 14, № 4, с. 92 101, 2008.
- 22. Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов Мыс Канаверал и Куру", Космічна наука і технологія, Т. 14, № 6, с. 89 98, 2008.
- 23. L. F. Chernogor, "Geomagnetic Field Fluctuations near Kharkov, which Accompanied Rocket Launches from the Baikonur Site", Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 49, № 3, pp. 384 396, 2009.
- 24. К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с различных космодромов мира", Космічна наука і технологія, Т. 15, № 1, с. 31 43, 2009.

## ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АГВ-ПИВ И ЕЁ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

#### О.Ф. Тырнов, Ю.П. Федоренко, В.Н. Федоренко, В.Л. Дорохов Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

Украина, Харьков, 61022, e-mail: <u>Oleg.F.Tyrnov@univer.kharkov.ua</u>.

Разработана полуэмпирическая модель акустико-гравитационных волн (АГВ) и перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), описывающая пространственновременную динамику параметров АГВ-ПИВ. Согласно модели крупномасштабные (КМ) и среднемасштабные (СМ) АГВ-ПИВ являются последовательными стадиями развития единого волнового процесса, порожденного одним и тем же источником. Модель связывает известные результаты теоретических и экспериментальных работ, полученные за шестидесятилетний период исследований. Проверка модели по экспериментальным данным, взятым из литературных источников, показала, что погрешность ее прогноза пространственных и временных периодов не превышает 12%.

Возможности модели проверены с использованием возмущений атмосферы, вызванных: наземными и высотными ядерными взрывами (около двух десятков) с эквивалентной энергией от 0,02 до 58 MT THT; двумя извержениями вулканов; магнитудой 7,5; высыпаниями энергичных протонов землетрясением с в магнитосферном каспе северного полушария Земли. При помощи трансионосферного использованием низкоорбитных навигационных радиозондирования с ИСЗ установлено, что в диапазоне географических широт ф ~ 33 ... 66°N для ПИВ электронной концентрации относительная амплитуда  $A_d$ горизонтальный пространственный период L, наклон фронта в вертикальной плоскости увеличиваются при уменьшении ф. Это указывает на то, что источник возмущений находится в высоких широтах. После начала отдельного возмущения значение L уменьшается от ~ 35000 до 200 км, а  $A_d$  – от ~ 1 до 0,02. Минимальное значение L всегда превышает ~ 150 ... 200 км при расстояниях до источника более ~ 500 км.

Обнаружено, что отсутствуют значимые суточные и сезонные изменения появляемости ПИВ, однако появляемость ПИВ возрастала от ~ 50% в 1987 г. до 98% в 2010 г. Почти двойной рост появляемости в указанный период обусловлен ростом солнечной активности, не связанной с числом солнечных пятен. Подтверждено, что появляемость ПИВ не зависит от числа солнечных пятен и магнитной активности. Установлена прямо пропорциональная зависимость *L* и *A*<sub>d</sub> при минимуме и максимуме солнечной активности (СА). Обнаружен и объяснен (на основе предложенной полуэмпирической модели) эффект пилообразной временной динамики L. Обнаружено, что при минимуме СА время жизни неоднородностей в несколько раз больше, чем при максимуме. Методика исследований и результаты подробно изложены в [1-3].

#### Описание модели зарождения и распространения АГВ-ПИВ [3].

Параметры источника. Характерный размер источника глобально наблюдаемых АГВ – около 5 км. В результате локального высвобождения энергии и импульса в объемном источнике происходят колебания атмосферного давления. Генерация колебаний начинается с почти двукратного понижения атмосферного давления воздуха относительно фоновых значений. При высыпании энергичных протонов в магнитосферный касп образуется вытянутый вдоль магнитной широты ~ 60 ... 75° протяженный источник исходного возмущения, он расположен на высоте ~ 100 ... 200 км, его поперечный размер ~ 5 км. Смежные минимумы и максимумы давления (экстремумы) следуют через постоянный интервал времени  $\tau_0 = 3,95$  мин,
который является полупериодом такого колебательного процесса. Каждый экстремум с номером *i* порождает атмосферную волну давления, распространяющуюся вдоль поверхности Земли со скоростью  $V_i$ . Скорость каждого экстремума не изменяется на расстояниях вплоть до ~14000 км. Для шарообразных источников фронт волны в горизонтальной плоскости представляет собой окружность. При высыпании энергичных протонов исходным фронтом можно приближенно считать линию или дугу магнитной параллели, совпадающую с продольной осью каспа. В обоих случаях пренебрегается влиянием ветров, региональными неоднородностями температуры и давления. В табл. 1 для первых шестнадцати экстремумов приведены амплитуды атмосферного давления  $A_i$ , нормированные на максимальное значение, и скорости  $V_i$ . Постулируется, что  $A_i$  и  $V_i$  не изменяются в ходе распространения АГВ-ПИВ.

i	$A_i$	$V_i$ , км с $^{-1}$
0	0,48	11,3155
1	0,83	3,0000
2	0,97	1,1539
3	1	0,6820
4	0,95	0,4688
5	0,88	0,3571
6	0,8	0,2809
7	0,7	0,2381
8	0,65	0,2000
9	0,55	0,1754
10	0,49	0,1585
11	0,41	0,1415
12	0,35	0,1245
13	0,29	0,1076
14	0,25	0,0906
15	0,22	0,0736
	<i>i</i> 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15	$\begin{array}{c ccc} i & A_i \\ \hline 0 & 0,48 \\ 1 & 0,83 \\ 2 & 0,97 \\ \hline 3 & 1 \\ 4 & 0,95 \\ \hline 5 & 0,88 \\ \hline 6 & 0,8 \\ \hline 7 & 0,7 \\ \hline 8 & 0,65 \\ \hline 9 & 0,55 \\ \hline 10 & 0,49 \\ \hline 11 & 0,41 \\ \hline 12 & 0,35 \\ \hline 13 & 0,29 \\ \hline 14 & 0,25 \\ \hline 15 & 0,22 \\ \end{array}$

Таблица	1.	Зависимость	$V_i$	$u A_i$	от
•					
1					

Таблица 2. Минимальные значения l<sub>i</sub> и L<sub>i</sub>

Номер	Время	$l_i$ , км	Номер	$L_i$ ,
$l_i$	появления,		$L_i$	КМ
	МИН			
1	3,95	711		
2	7,9	273,5	1	984,5
3	11,85	161,6		
4	15,8	111,1	2	272,7
5	19,75	84,6		
6	23,7	66,6	3	151,2
7	27,65	56,4		
8	31,6	47,4	4	103,8
9	35,55	41,6		
10	39,5	37,6	5	79,1
11	43,45	33,5		
12	47,4	29,5	6	63,1
13	51,35	25,5		
14	55,3	21,5	7	47
		-		-

Параметры АГВ-ПИВ. Все параметры АГВ не зависят от геомагнитного поля, однако амплитуда ПИВ определяется углом, который составляет волновой вектор АГВ с плоскостью геомагнитного меридиана, и углом магнитного наклонения над измерительным пунктом (ИП). Если источник возмущения находится в северном географическом полушарии, то знак отклонения  $\Delta N$  от фоновых значений основного максимума ионизации  $N_m$  (минимум или максимум цуга ПИВ) определяется знаком эмпирической зависимости:

$$J_{\Delta N} = \sin \left(2\theta\right) \cos \left(\phi_{\Pi HB}\right) + 0.1 \sin^2 \left(\theta\right),\tag{1}$$

где  $\theta$  – угол магнитного наклонения, являющийся положительным в северном географическом полушарии и отрицательным – в южном полушарии,  $\varphi_{\Pi UB}$  – угол между волновым вектором АГВ и направлением на северный магнитный полюс в выбранной точке наблюдения (изменяется в диапазоне от 0 до  $2\pi$ ). Положительные значения  $J_{\Delta N}$  пропорциональны  $\Delta N/N_m$ . При отрицательных значениях  $J_{\Delta N}$  величина ( $\Delta N/N_m + 1$ ) пропорциональна  $\exp(J_{\Delta N})$ . Здесь  $\Delta N$  – абсолютное значение амплитуды ПИВ.

Для выбранного расстояния R от источника возмущения (вдоль поверхности Земли) временной интервал  $t_{i,i+1} = t_{i+1} - t_i$  между соседними экстремумами цуга (далее временной полупериод  $\tau_i$ ,) рассчитывается по линейной зависимости:

$$\tau_i = t_{i,i+1} = \tau_0 + R (1/V_{i+1} - 1/V_i).$$
(2)

Сумма двух смежных полупериодов  $\tau_i$  и  $\tau_{i+1}$  представляет собой временной квазипериод  $T_i$ .

Горизонтальное расстояние между смежными  $(i \ u \ i+1)$  экстремумами цуга АГВ или пространственный горизонтальный полупериод цуга обозначим  $l_i$ . Сумма смежных полупериодов  $l_i$  и  $l_{i+1}$  является пространственным квазипериодом  $L_i$ . Значение  $l_i$  увеличивается с течением времени согласно зависимости:

$$l_i = V_i \ \tau_0 + (V_i - V_{i+1}) \ t' \tag{3}$$

где  $t' = t - i\tau_0$ . Здесь время t (также как и ранее) отсчитывается от момента зарождения первого экстремума (максимума). В момент t' = 0 зарождается выбранный полупериод  $l_i$ . Минимальные значения  $l_i$  и  $L_i$  наблюдаются в момент их зарождения. Такие стартовые (начальные) значения первых четырнадцати полупериодов и семи квазипериодов приведены в табл. 2.

Например, пятый квазипериод цуга с L = 79,1 км зарождается приблизительно на сороковой минуте после возникновения первого экстремума, а седьмой с L = 47 км – на ~ 55 минуте. С течением времени, при удалении цуга АГВ от источника возмущений его пространственные полупериоды  $l_i$  и квазипериоды  $L_i$  линейно увеличиваются от стартовых значений. Обозначим  $R_1$  расстояние между источником возмущения и первым экстремумом в цуге АГВ. Согласно расчётам, при  $R_1 = 1500$  и 3000 км первый период цуга относится к КМ ( $L \approx 1500 - 2600$  км), а последующие – к СМ ПИВ ( $L \approx 340$  км). Наименьшее значение L при таких удалениях первого экстремума от источника составляет более ~ 300 км.

**Пространственные сканы полупериодов**. Расстояние  $R_i$  между возмущающим источником и ближайшей к источнику границей квазипериода  $l_i$  в цуге АГВ для заданного значения  $R_1$  описывается выражением:

$$R_{i} = R_{1} - \sum_{i=1}^{i} l_{i}, \tag{4}$$

где  $l_i = V_i \tau_0 + (V_i - V_{i+1}) t'_i, t'_i = t_1 - i \tau_0, t_1 = R_1/V_1.$ 

Высота расположения и толщина слоя. КМ ПИВ наблюдаются в волноводе Земля-ионосфера с эффективной толщиной 2H= 160 км и с максимумом амплитуды на высоте  $z_m$  расположения  $N_m$ . СМ АГВ являются свободно распространяющимися по всем направлениям от источника волнами. После отражения от поверхности Земли эти волны на ионосферных высотах порождают СМ ПИВ, наблюдаемые в слое с эффективной толщиной 2H= 50 км и продольной осью, расположенной на высоте  $z_m$  (как и в случае КМ ПИВ). Угол падения и отражения этих волн тем больше, чем дальше отстоит точка отражения (скачка) от источника возмущений. В нашей модели пренебрегается увеличением пути распространения СМ ПИВ из-за таких скачков.

Угол наклона фронта АГВ в вертикальной плоскости. Фронт АГВ-ПИВ в вертикальной плоскости имеет наклон в сторону своего движенения при любом механизме распространения возмущений: волноводном либо скачковом. Только в последнем случае этот наклон значительно больше. Модуль угла наклона ξ (в радианах) фронта СМ и КМ АГВ-ПИВ в вертикальной плоскости определяется соответственно зависимостями:

$$\xi = \operatorname{arctg} \left( \frac{R}{z_m} + z_0 \left( \frac{R_E + z_m}{R_E + z_0} \right) \right), \tag{5}$$

$$\xi = 2, 1 \cdot 10^{-4} R, \tag{6}$$

где  $R_E$  – радиус Земли,  $z_0$  – высота расположения источника над поверхностью Земли, величина R в (6) отсчитывается на высоте  $z_m$  в километрах.

Пространственное распределение электронной концентрации. Если на измерительном пункте (ИП) азимут волнового вектора ПИВ равен  $\alpha$  (отсчитывается от направления на север), то в заданный момент времени пространственная горизонтальная модуляция N над регионом ~ 1500 км приближённо описывается выражениями:

$$N = N_n \left[ 1 + A_d F(z) F_1(\phi, \lambda) \right],$$

$$F(z) = \exp\left[ -\frac{(z - z_m)^2}{H^2} \right],$$

$$F_1(\phi, \lambda) = \sin[m_{\phi}(\phi - \Delta \phi) + m_{\lambda}(\lambda - \Delta \lambda) + \Phi],$$
(7)

$$\Delta \varphi = \pm \frac{z - z_m}{R_E + z_m} tg\xi, \qquad \Delta \lambda = \pm \frac{z - z_m}{R_E + z_m} tg\xi, \quad m_\varphi = \frac{2\pi}{L} \left( R_E + z_m \right) \cos \alpha, \quad m_\lambda = \frac{2\pi}{L} \left( R_E + z_m \right) \sin \alpha, \\ \xi = \xi_0 - (\varphi - \varphi_0) k_\xi, \quad \varphi_0 = 50^\circ N,$$

где  $\varphi$ ,  $\lambda$  –географические широта и долгота ИП соответственно,  $\xi_{50}$  – угол наклона при  $\varphi = \varphi_0$ ,  $A_d = A_{d50} - (\varphi - \varphi_0) k_{Ad}$ ,  $N_n$  – невозмущенное пространственное распределение электронной концентрации в заданный момент времени, рассчитанное по глобальной ионосферной модели;  $A_{d50}$  – относительная амплитуда ПИВ при  $\varphi = \varphi_0$ ,  $\Phi$  – начальный сдвиг фазы выбранного гармонического возмущения,  $k_{Ad}$  и  $k_{\xi}$  – коэффициенты пропорциональности, z – высота над поверхностью Земли. Знак в формулах для  $\Delta \varphi$  и  $\Delta \lambda$  выбирается в зависимости от относительного положения источника ПИВ и ИП. Если источник находится севернее или западнее ИП, то выбирается знак минус. В противном случае выбирается знак плюс. Функции F(z) и  $F_1(\varphi, \lambda)$  определяют изменения амплитуды и фазы ПИВ в зависимости от z,  $\varphi$  и  $\lambda$ . Глобальная модель ионосферы должна корректироваться с использованием сигналов навигационных спутников [1]. Модель (7) применялась для решения обратной задачи в экспериментах по трансионосферномузондированию ионосферы.

### Литература

- 1. О.Ф. Тырнов, Ю.П. Федоренко, Л.Ф. Черногор, «Исследование волновых возмущений электронной концентрации с помощью радиопросвечивания ионосферы когерентными сигналами навигационных спутников Земли», Успехи современной радиоэлектроники, №1, сс. 36–80, 2005.
- 2. Ю.П. Федоренко, О.Ф. Тырнов, В.Н. Федоренко, «Оценки параметров ионосферных возмущений, полученные на основе радиопросвечивания ионосферы сигналами низкоорбитных ИСЗ», Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50, № 4. сс. 514–529, 2010.
- Yu.P. Fedorenko, O.F. Tyrnov, V.N. Fedorenko, V.L. Dorohov, «Model of traveling ionospheric disturbances», J. Space Weather Space Clim. V. 3, A30, 2013, http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2013052.

# ВОЗМУЩЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫЕ ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА

### Л.Ф. Черногор, Ю.Б. Милованов, В.Н. Федоренко, А.М. Цымбал

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы 4, Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

**Введение.** Челябинский метеороид вторгся в атмосферу Земли 15 февраля 2013 г. в 03:20:26 UT. Он двигался примерно с юго-востока на северо-запад, азимут был близок к 290°. Угол наклона траектории к горизонту составлял около 20°. Начальные диаметр тела, масса и скорость составляли, соответственно, ~18 м, ~11 кт и ~18,5 км/с [1–3]. Найденные осколки космического тела свидетельствовали о том, что он представлял собой хондрит.

Основное взрывоподобное выделение энергии произошло вблизи высоты 25 км в точке со следующими географическими координатами:  $54,8^{\circ}$ с.ш.,  $61,5^{\circ}$  в.д. Энергия взрыва была близка к  $10^{15}$  Дж. Энергия ударной волны составляла около  $0,6\cdot10^{15}$  Дж. По мере удаления ударной волны от области взрыва она постепенно ослабевала, превращаясь в акустико-гравитационную волну. При этом, как показывают расчеты, заметные возмущения электронной концентрации ионосферы N должны наблюдаться на расстояниях R в сотни и даже тысячи километров от места взрыва [4].

Целью настоящей работы является изложение результатов спутниковых наблюдений квазипериодических (волновых) возмущений полного электронного содержания ионосферы, вызванных падением метеороида.

Средства и методы. Для диагностики возмущений, вызванных падением Челябинского метеороида, в данной работе использовались регистрации радиосигналов спутников GPS, полученные на станциях наблюдения "ARTU", "TRIM" и "TUMP", расположенных в районе падения метеороида.

На рис. 1 приведены расчетные траектории подионосферных точек для пролетов различных спутников 15 февраля 2013 года относительно станций наблюдения "ARTU", "TRIM" и "TUMP". Высота ионосферной точки принималась равной 350 км.



Рис. 1. Траектории подионосферных точек спутников; кружками отмечены положения пунктов наблюдения с указанием имени станции, крестики – точка взрыва.

Отметим, что из-за относительно малой скорости сканирования (~ 100 м/с) возмущенной области ионосферы при полете ИСЗ системы GPS характер наблюдаемых вариаций электронного содержания, вообще говоря, может быть обусловлен как пространственными особенностями возмущенной области, так и временными изменениями ПЭС. Однако, поскольку падение метеороида имело место уже после восхода Солнца в ионосфере над г. Челябинск и эффекты утреннего терминатора уже не проявлялись, вариации ПЭС обусловлены, в первую очередь, пространственный структурой возмущений. При этом характерный горизонтальный пространственный масштаб (длина волны возмущения)  $\lambda$  может быть оценен из следующей простой формулы:

$$\lambda = v_{\rm s} \frac{z_i}{z_s} T \tag{1}$$

где  $\mathcal{U}_{s} \sim 3,8$  км/с – скорость спутника, T – период наблюдаемых колебаний,  $z_{i}$  и  $z_{s}$  – соответственно высота ИСЗ и оценка высоты в ионосфере, на которой проявляется возмущение.

Непосредственно для обнаружения волновых возмущений (BB), сгенерированных пролетом Челябинского метеороида, анализировались временные вариации производной  $N_L$  – наклонного электронного содержания между пунктом наблюдения и соответствующим ИСЗ, которое прямо определяется по регистрациям сигналов спутников.

Состояние космической погоды в период измерений было спокойным, отсутствовали возмущения, вызванные процессами на Солнце, что благоприятствовало выделению возмущений в ионосфере, обусловленных именно падением Челябинского метеороида.

#### Результаты наблюдений

Иллюстрации временных вариаций  $\dot{N}_L$  для станции TRIM и ИСЗ G6 для периода падения метеороида, предшествующего и последующего дней приведены на рис. 2. Видно наличие квазиволновых вариаций  $\dot{N}_L$  после взрыва метеороида. Анализ всех данных для этого пункта показал, что примерно через 18 мин после взрыва метеороида возникли колебания  $\dot{N}_L$  с периодом  $T \approx 15$  мин, длительностью около 60 мин и относительной амплитудой  $\dot{\delta} = \Delta \dot{N}_{Lmax} / \bar{N}_L = (5-25)10^{-5} \text{ c}^{-1}$ 



Рис. 2. Временные вариации  $\dot{N}_L$  для ИСЗ G6

Для спутников G15 и G26 наблюдался сильный выброс  $\dot{N}_L$  сначала в сторону положительных значений, а затем в сторону отрицательных значений. Такое поведение свойственно ударным волнам. После указанных всплесков имело место квазипериодическое изменение  $\dot{N}_L$ .

Аналогичное поведение  $\dot{N}_{L}$  имело место и для других станций. Для станции ARTU квазипериодические вариации  $\dot{N}_{L}$  возникли примерно через 18 мин после взрыва, периоды их составляли 8 и 16 мин,  $\dot{\delta} = (8-30) \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ . Для станции TUMP наблюдались колебания с периодами 8 – 10 и 25 мин,  $\dot{\delta} = (2-3.5) \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ , их длительность составила 35 – 40 мин.

#### Обсуждение

Скорость распространения ВВ дается очевидным соотношением:

$$v = \frac{R}{\Delta t}$$

где R – удаление ионосферной точки (около высоты 350 км, область, дающая основной вклад в ПЭС – 200-500 км) от места взрыва,  $\Delta t$  – время запаздывания возмущения относительно момента взрыва. Оценки дают величину  $v \approx 500 - 530$  м/с.

В спутниковых наблюдениях возникают искажения величины периода колебаний ПЭС. К этому приводит движение ИСЗ, точнее ионосферной точки, и усреднение несинфазных по высоте (дальности) ВВ концентрации электронов вдоль наклонного радиолуча от спутника до приемника. Рассмотрим эти искажения периода несколько подробнее.

Измеренная частота колебаний ω' связана с реальной частотой ω периодического процесса следующим соотношением:

$$\omega' = \omega - \mathbf{k} \mathbf{w}$$
,

где **k** – волновой вектор BB, **w** – скорость движения ионосферной точки. Изменение частоты BB вызвано эффектом Доплера. Переходя к периодам  $T' = 2\pi/\omega'$ ;  $T = 2\pi/\omega$ , получим, что

$$T \equiv T'(1 + \frac{W_{||}}{v}),$$

где  $\mathbf{w}_{||} = (\mathbf{kw})/\mathbf{k}$  – проекция **w** на вектор **k**,  $\mathcal{V}$  – скорость BB. Полагая, что  $\mathbf{w}_{|} \approx 70$  м/с,  $\mathcal{V} \approx 700$  м/с, приходим к соотношению  $(T - T')/T' \approx 0.1$ . Таким образом, для спутников GPS изменением  $\omega$  и T за счет эффекта Доплера часто можно пренебречь.

В ряде случаев более существенной является вторая причина. Поскольку в диапазоне высот 200 – 500 км начальная фаза ВВ существенно отличается на разных дальностях, при усреднении вдоль радиолуча происходит не только кажущееся уменьшение периода, но и уменьшение амплитуды ВВ. Кроме того, ВВ сильно локализовано по высоте. Оно занимает эффективный диапазон высот  $\Delta z \approx 50 - 100$  км. Наши модельные расчеты показали, что период и амплитуда ВВ из-за несинфазности колебаний на разных высотах могут уменьшиться на десятки процентов и более. Оценки интенсивности ВВ, проведенные с учетом этих обстоятельств, дают значения  $\delta_N = \Delta N / N \sim 2-25\%$ . Важно, что амплитуда ВВ, последовавших за взрывом метеороида была заметно больше, чем в контрольные интервалы времени.

По соотношению (1) оценим пространственный масштаб ВВ. Если T = 8 - 10 мин,  $\lambda \approx 30 - 40$  км. При  $\mathcal{V} \approx 500$  м/с имеем период ВВ  $\lambda / \mathcal{V} \approx 65 - 80$  с. Такие периоды свойственны инфразвуку на высотах *F*-области ионосферы.

Полученные параметры BB свидетельствуют о том, что взрыв Челябинского метеороида привел к генерации акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере. Параметры волн хорошо согласуются с параметрами, оцененными авторами [4].

Представляет интерес сравнение параметров BB, сопровождавших падение Челябинского метеороида, с параметрами волн, генерируемых землетрясениями, мощными взрывами и стартами крупных ракет. Мониторинг BB, вызванных этими источниками, проведен авторами [5]. При магнитуде землетрясения  $M \approx 7 - 8$  (энерговыделение ~  $10^{15} - 10^{17}$  Дж  $\approx 0.25 - 25$  Мт ТНТ) в [5] получено, что  $T \approx 3 - 10$  мин,  $\delta \approx 1 - 3$  % на расстояниях от эпицентра ~ 100 - 1000 км. Средняя скорость BB близка к 700 м/с.

Наземный взрыв с энерговыделением 2 кт ТНТ привел к возникновению над эпицентром на ионосферных высотах *N*-образного возмущения концентрации электронов с  $T \approx 3$  мин,  $\delta \approx 7.5$  %. Скорость распространения BB была близка к 700 м/с [5].

При стартах мощных ракет (энерговыделение ~  $10^{11} - 10^{13}$  Дж  $\approx 0.25 - 25$  кт ТНТ) ВВ имели следующие параметры:  $T \approx 3 - 6$  мин,  $v \approx 600 - 900$  м/с и  $\delta \approx 1$  % [5].

Из приведенных данных следует, что разные по своей физической природе источники генерировали колебания инфразвукового диапазона с близкими периодами. Значения относительных амплитуд, естественно, зависели от величины энерговыделения и расстояния от источника до места наблюдения. Как правило, хорошо проявлялись особенности ударно-волнового воздействия.

### Выводы

1. Экспериментально установлено, что пролет и взрыв метеороида «Челябинск» привел к генерации и распространению ВВ с параметрами акустических волн (*T*=65-80 с).

2. Длительность волнового цуга составляла не более 5 – 6 периодов.

3. Значения периодов ВВ составляли 8 – 10 мин.

4. Значения относительных амплитуд BB  $\delta_N$ =2,5-25 %.

5. Скорость распространения ВВ составляла ~500 м/с.

Авторы благодарны Международной службе IGS, а также сотрудникам станций TRIM, TUMP за возможность использования первичных данных измерений.

## Литература

1. http://neo.jpl.nasa.gov/fireballs.html

- 2. http://neo.jpl.nasa.gov/news/firebakk\_130301.html
- 3. http://newsroom.ctbto.org/2013/02/18russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors
- 4. Chernogor L.F. Physical effects of Chelyabinsk meteorite in the atmosphere and geospace. Astronomy and Space Physics in Kyiv University. Book of Abstracts. International Conference. Kyiv, Ukraine, May 21–24, 2013. P. 82–84.
- 5. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006.

# МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ СПОКОЙНОЙ И ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ НА ВЫСОКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТАХ

### Е.М. Занимонский

Радиоастрономический институт НАН Украины, Украина, Харьков, 61002, ул. Краснознаменная, 4, г. e-mail: <u>zanimonskiy@rian.kharkov.ua</u>

Исследования динамики ионосферы являются весьма актуальными в связи с тем, что ионосфера зачастую проявляет себя как чувствительная среда, реагирующая наблюдаемым образом на процессы в атмосфере и геокосмосе, не регистрируемые напрямую современными техническими средствами. Исследуя вариации параметров ионосферы можно пытаться решать обратные задачи моделирования механизмов воздействия на ионосферу сверху и снизу. В докладе излагаются некоторые результаты и особенности использования данных ГНСС для исследования средне и крупномасштабных ионосферных образований с целью развития представлений об их природе.

На основании длительных наблюдений за фоновыми вариациями электронной концентрации высокоширотной ионосферы в регионе Антарктического полуострова можно утверждать, что они являются не случайными, а закономерными, имеют устойчивый характер, вполне определенным образом зависят от времени суток и сезона. Представляется, что электродинамическая связь, объединяющая магнитосферу, ионосферу и термосферу при этом является существенным фактором, обеспечивающим периодическую циркуляцию плазмы, модулируемую суточным вращением Земли. Вместе с тем, нельзя не учитывать возможного воздействия термосферных ветров на ионосферную плазму. Успешное раскрытие загадок этого воздействия позволило бы создать средство для мониторинга ветров по наблюдениям вариаций полного электронного содержания ионосферы, сезонно-суточная модель которых представлена в докладе.

Данные, получаемые приемниками перманентных станций ГНСС, общедоступны в Интернете и неоднократно использовались учеными для исследования реакции ионосферы на возмущения «сверху», от Солнца, и «снизу», от тропосферных природных и техногенных процессов. Утверждается, что можно обнаружить последствия запусков космических ракет и землетрясений, тропических циклонов и затмений Солнца. Некоторые из этих выводов не подлежат сомнению, тем не менее, весьма актуальной является задача оценки уровня ионосферных возмущений и надежной идентификации их источников.

В докладе изложена концепция индекса возмущенности, чувствительного к наличию слабых возмущений, показана возможность описания, с его помощью, реакции ионосферы на мощные тропосферные события. В качестве измерительного «полигона» использовался европейский континент, хотя и достаточно спокойный в погодном плане, но зато хорошо обеспеченный средствами метеорологической и ионосферной диагностики. Для подробного анализа тропосферно-ионосферных связей было выбрано прохождение мощного атмосферного фронта над Европой в январе 2007 года. Показана также возможность использования общедоступных данных ГНСС для морфологического анализа и моделирования ионосферных процессов, определяемых солнечной активностью, на фоне которых проявляются геофизические эффекты воздействия на ионосферу со стороны тропосферы.

Изменения параметров ионосферы во время солнечного затмения, в литературе отражены достаточно полно, в частности обнаружено уменьшение критических частот

различных слоев и полного электронного содержания, увеличение высоты отражения при вертикальном и наклонном зондировании и т.п. В то же время сопоставление изменений параметров ионосферы в зоне затмения при разной солнечной активности в доступной литературе не встречалось.

ионосферы значительной Так как состояние В мере определяется характеристиками потоков солнечного ионизирующего излучения на различных длинах волн, вполне естественно использовать ионосферные данные для решения обратной задачи восстановления параметров этих потоков. Исследовались вариации полного электронного содержания с периодами около часа и менее, с пространственными масштабами в сотни километров, характерными для траектории лунной тени. Были построены модельные распределения яркости ионизирующего излучения по видимому диску Солнца, от равномерного, на минимуме активности до косинусоидального - в максимуме. Впрочем, вполне реалистичной может оказаться также гипотеза о влиянии изменений высотного профиля ионосферы из-за вариаций состава ионизирующего излучения на разных фазах цикла солнечной активности.

# СВЯЗЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБЛАСТИ F2 ИОНОСФЕРЫ ОТО ДНЯ КО ДНЮ С ПРОЦЕССАМИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ТРОПОСФЕРЕ

## И. Г. Захаров

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина. Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы, 4, тел.: (380)7071051, e-mail: giz-zig@ukr.net

Введение. Проблемы изменчивости ионосферы ото дня ко дню является одной из наиболее актуальных и сложных [1], при этом значительные изменения параметров ионосферы ото дня ко дню фиксируются не только в периоды мощных событий. Цель работы – изучить особенности постоянно существующей изменчивости ионосферы на примере одного из наиболее доступных параметров – критической частоты области F2 ионосферы (f<sub>0</sub>F2). Анализ выполнен на основе длительных ежедневных рядов наблюдений, которые включают как спокойные, так и магнитовозмущенные условия в ионосфере. Использованы данные двух ионосферных станций, расположенных на большом расстоянии друг от друга (для учета роли локальных эффектов): Боулдер (40 N; 255 E) и Хабаровск (48 N; 135 E) за период с октября 2010 по декабрь 2011 года в 00 и 04 (ночные условия) и 12 и 16 (дневные условия) часов местного времени (LT), а также следующие факторы: солнечная активность (СА: число Вольфа W и плотность потока радиоизлучения Солнца F<sub>10.7</sub> - отражают изменения ионизирующего волнового излучения; геомагнитная активность (ГМА: индекс Ар - отражает сложным образом динамические процессы в ионосфере, в том числе сопровождающихся изменениями нейтрального состава; приземное атмосферное давление (ПАД: косвенно отражает перестройки атмосферной циркуляции с созданием условий, благоприятных для проникновения в ионосферу акустико-гравитационных волн. Рассматривались изменения f<sub>0</sub>F2 ото дня ко дню после резких изменений СА, ГМА, ПАД методом наложенных эпох с проверкой достоверности результатов расчетов по критерию Фридмана [1], а также рассчитывались и сопоставлялись спектры исследуемых переменных за периоды по 60 дней.

**Результаты**. Принято, что в течение суток значительные изменения ионосфера претерпевает вблизи моментов восхода и захода Солнца. Однако часто изменения  $f_0$ F2 ото дня ко дню существенно различаются даже в близкие часы (см. пример на рис. 1), при этом в 16 LT изменения  $f_0$ F2 следуют за изменениями CA, в 18 LT – проявляется влияние CA и ГМА, а 12 LT наблюдаются 3-4 суточные колебания с одним и тем же размахом, явным образом не зависящие от CA и ГМА. В некоторых случаях такие 3-4 суточные вариации наблюдаются в течение всех суток на протяжении нескольких недель.

Метод наложенных эпох. После начала геомагнитной бури (ГМБ: резкий рост Ар-индекса) изменения  $f_0$ F2 были ожидаемыми только в ночных условиях на обеих станциях, в дневных условиях – невелики. Следует отметить также скачок ПАД в Боулдере и в Хабаровске в день начала или на следующий день после начала ГМБ после.



Рис. 1. Изменения f<sub>0</sub>F2 (Боулдер) ото дня ко дню в различные часы местного времени

Просматривается определенная связь между изменениями ПАД и ионосферных вариаций в Боулдере и Хабаровске (рис. 2) на каждой из станций изменения  $f_0$ F2 имеют очевидное сходство с изменениями ПАД на этой же станции и заметно отличаются от результатов для другой станции. Следует обратить внимание также на то, что эта связь проявляется без заметного запаздывания по времени.

Подобная связь представляется достаточно неожиданной, поскольку хорошо известно, что влияние даже достаточно мощных процессов в тропосфере на ионосферу реализуется только при выполнении определенных условий по направлению и скорости ветра [3]. В данном случае расчеты проведены для ежедневных данных без какого-либо отбора, кроме того, запаздывание изменений в ионосфере по отношению к процессам в тропосфере не превышает 1 сутки, т.е. возможен иной канал поступления энергии снизу вверх или должна выполняться синхронизация процессов в разных оболочках Земли.



Рис. 2. Связь изменений ПАД и *f*<sub>0</sub>F2. Шкала для ПАД в Боулдере направлена вниз.

Резкое изменение ПАД в Хабаровске или в Боулдере сопровождались определенными изменениями в ионосфере по данным для 04 и 12 LT.. Следует отметить, что ПАД в Боулдере и Хабаровске изменялось в противофазе (достоверный результат; p<0,05). Учитывая, что между этими городами десятки тысяч километров, для такой синхронизации (в противофазе) необходимо наличие некоторых закономерностей в поведении атмосферы планетарного масштаба либо наличие общего «регулятора» за пределами атмосферы. Отметим, что изменения *f*<sub>0</sub>F2 ото дня ко дню в

двух городах также проявляют тенденцию к изменению в противофазе, но эти изменения практически незаметны на фоне вариаций другой природы.

На основании приведенных выше данных не ясно, можно ли отнести изменения в ионосфере к влиянию тропосферы, так как одновременно наблюдались также заметные изменения ГМА. С другой стороны, несмотря на несколько вариантов отбора данных для расчетов, квазисинхронные изменения отмечались для большинства рассмотренных показателей.

Спектральный анализ. В целом для решения рассматриваемой задачи спектральный анализ оказался менее информативным, прежде всего из-за необходимости (для достижения точности) проводить расчеты по данным за 60 дней, тогда как периоды устойчивых флуктуаций  $f_0F2$  не превышают 3-4 недель. Однако и в этом случае было установлено несколько периодов, когда для большинства рассмотренных показателей установлены совпадающие или близкие периоды.

Более того, при наличии общих или близких пиков в геомагнитных данных и ПАД в ионосферных данных возможно не только наличие общих пиков (отмечены кружками), но и сходство спектров в целом (отмечены ломаными линиями), т.е. изменения в ионосфере в определенной мере синхронизируются с изменениями в вышележащих и нижележащих областях атмосферы.

Отметим еще одну особенность: в ионосферных данных, особенно в дневных условиях, в большинстве случаев уверенно проявляется в спектре пик, соответствующий даже небольшому пику в  $F_{10,7}$ . Оценки для периодов, когда наблюдался устойчивый периодический процесс с указанным периодом (по ежедневным данным), показывают, что изменения критической частоты составляют 10 – 20 %, тогда как ожидаемые изменения УФ-излучения не превышают 5 %. Такие ситуации встречались неоднократно.

Обсуждение. Обычно при анализе влияния на ионосферу различных факторов рассматривают явления, в которых внешний фактор за счет привнесенной энергии полностью определяет вариации ионосферного параметра. Вместе с тем, нельзя исключить, что реализуются и другие («информационные») механизмы, которые только запускают ионосферный процесс, а его развитие полностью определяется энергией системы. Как известно, такие механизмы широко рассматриваются при анализе возможного влияния солнечной активности на земную погоду и биосферу. Нельзя исключить, что одновременно может реализовываться несколько таких механизмов. В конечном счете, подобный «информационный» обмен может привести к установлению квазисинхронных изменений в различных оболочках земной атмосферы. Полученные данные, прежде всего, взаимно согласованные скачки таких показателей как, геомагнитная активность, электронная концентрация ионосферы и атмосферное давление в далеко разнесенных пунктах, можно рассматривать как одно из подтверждений реализации подобных механизмов. Развиваемые представления находятся в согласии с представлениями о системе Земля-атмосфера-геокосмос как открытой линамической нелинейной системы [4].

Заключение. Часть установленных вариаций ионосферы ото дня ко дню обусловлена откликом ионосферы как открытой нестационарной системы, при этом внешний фактор выполняет роль спускового крючка, а отклик определяется внутриионосферными процессами. Это, прежде всего, флуктуационный характер изменений  $f_0$ F2 в околополуденные часы, связь изменений в ионосфере и тропосфере при отсутствии мощных источников возмущения в тропосфере. Нельзя исключить также возможности квазисинхронных вариаций в системе тропосфера – ионосфера - геокосмос.

## Литература

- 1. S. Pulinets., K. Boyarchuk. Ionosperic Precursors of Earthquakes. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2004. 315 p.
- 2. К.А. Браунли. Статистическая теория и методология в науке и технике.- М., Наука, 1977.- 245 с.
- 3. А.Д. Данилов. Популярная аэрономия. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 230 с.
- 4. Л.Ф. Чорногор. Земля атмосфера геокосмос як відкрита динамічна нелінійна система. Міжнародна наукова конференція. Каразінські природознавчі студії. 14 16 червня 2004 р., м. Харків, Україна. Матеріали конференції. Харків. 2004. С. 155 156.

# ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ ИОНОСФЕРНОГО СИГНАЛА СТАНЦИИ РБУ

#### К.П. Гармаш, С.Г. Леус, С.Н. Похилько Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы, 4, Konstantin.P.Garmash@univer.kharkov.ua

Для целей автоматизированного измерения вариаций характеристик (фазы и амплитуды) сигналов километрового диапазона длин волн при их распространении в полости Земля–ионосфера создана приемная система на базе доработанного приемника-компаратора ПК-66. В качестве зондирующих используются радиосигналы станции РБУ российской службы эталонных сигналов частоты и времени (несущая частота f = 66.(6) кГц, фазовая модуляция), расположенной вблизи г. Москвы, Россия (географические координаты:  $56.75^{\circ}$  с. ш.,  $37.5^{\circ}$  в. д.). Приемная система расположена в г. Харькове, Украина (географические координаты:  $50^{\circ}$  с. ш.,  $36.25^{\circ}$  в. д.). Ее блоксхема приведена на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2.



Рис.1. Блок-схема системы для исследования ионосферных вариаций фазы и амплитуды сигнала станции РБУ. МА – рамочная магнитная антенна; 1 – доработанный приемник-компаратор ПК-66; 2 – измерительно-регистрирующий блок; 3 – рубидиевый стандарт частоты Ч1-69; 4 – USB флэш-накопитель.



Рис. 2. Внешний вид приемной системы. Верхний прибор – приемник ПК-66 с магнитной антенной (слева) и микро-контроллерным регистратором фазы и амплитуды; нижний – рубидиевый стандарт частоты Ч1-69.

Для определения величины фазовых вариаций реализован аппаратный метод синхронного детектирования усредненных на четвертьпериодных интервалах времени квадратурных компонент сигнала с микропрограммной реализацией определения по ним фазы и устранения неоднозначности обратных тригонометрических функций в интервале углов 0° ÷ 360°. Стабильность время-частотных параметров системы (значение долговременной относительной нестабильности частоты образцового сигнала порядка (1 ÷ 2)·10<sup>-11</sup> и относительная погрешность установки его частоты не хуже  $10^{-10}$ ) обеспечивает либо внутренний (типа FE-5680A) для измерительнорегистрирующего блока, либо внешний (Ч1-69) рубидиевые стандарты частоты. Отсчеты фазы и амплитуды, усредненные на секундных интервалах времени, раз в

секунду сохраняются в файлах на внешнем USB-флэш-накопителе. Погрешность значений фазы после обработки экспериментальных данных, как правило, близка к 0.1° ÷ 0.3°, а относительная погрешность измерения амплитуды составляет единицы процентов.

Принцип действия использованного фазометра поясняет рис. 3. Опорный сигнал из внутреннего или внешнего стабильного генератора частотой 1 или 5 МГц и амплитудой 0.5 ÷ 1 В попадает на двухступенчатый умножитель частоты. Первая ступень превращает входной сигнал частотой 1 МГц в стандартный сигнал TTL-логики и умножает его частоту в 5 раз. Для сигнала с частотой 5 МГц эта ступень лишь выполняет функции буферного каскада. Далее цифровой сигнал с частотой 5 МГц подается на вторую ступень умножения с коэффициентом 4. Сформированный стабильный цифровой сигнал с частотой 20 МГц подается на тактовый вход микроконтроллера ATmega168. С помощью таймера ТО микроконтроллера тактовая частота делится на 75 и выдается образцовая последовательность импульсов длительностью 0.5 мкс и с частотой следования, в 4 раза превышающей несущую частоту радиосигнала.



Рис.3. Блок-схема измерительнорегистрирующего блока. 1 внутренний опорный генератор; 2 – умножитель частоты 1 МГц на пять, или буферный каскад для частоты 5 МГц; 3 – умножитель частоты на четыре: 4 микроконтроллер ATmega168; 5 – двоичный счетчик; 6 – четырехканальный коммутатормультиплексор с выходными фильтрами нижних частот; 7 внешний USB-флэш-накопитель; 8 – алфавитно-цифровой жидкокристаллический индикатор.

Импульсы подаются на вход открывания ключей цифрового четырехканального коммутатора-мультиплексора и на вход двоичного счетчика. На сигнальный вход коммутатора подается радиосигнал с выхода блока приемника частотой 66 кГц, а к его выходам подключены идентичные фильтры нижних частот (ФНЧ, частота среза около 1 кГц по уровню – 3 дБ). Адресная двухбитовая комбинация, которая поступает с выходов двоичного счетчика, определяет открытый в данный момент канал коммутатора. Каждый ключ коммутатора пропускает через себя радиосигнал на протяжении времен, которые являются определенными четвертями его неискаженного периода. После фильтрации ФНЧ низкочастотной составляющей, усредненные на четвертьпериодных интервалах времени квадратурные компоненты оцифровываются с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. По алгоритму микроконтроллерной программы выполняется первичная цифровая обработка этих квадратурных компонент для однозначного определения по ним фазы в интервале углов 0 ÷ 360°. Отсчеты фазы один раз в секунду сохраняются на внешнем носителе информации.

Сигнал с выхода схемы автоматической регулировки усиления (АРУ) приемника ПК-66, который несет информацию об амплитуде принимаемого сигнала, также подается на один из входов мультиплексора АЦП, преобразуется в цифровой вид и сохраняется на внешнем носителе вместе с отсчетами фазы. Амплитудная характеристика тракта измерения уровня сигнала (см. рис. 4) оказывается нелинейной,

ее вид учитывается при дальнейшей обработке. Долговременную стабильность параметров измерительного блока с включенным внутренним опорным стандартом FE-5680A иллюстрирует рис. 5, на котором приведена суточная регистрация фазы и амплитуды гармонического сигнала с частотой 66.(6) кГц и уровнем около 7 мкВ, сформированного из стабильного сигнала внешнего рубидиевого стандарта частоты Ч1-69 и поданного на антенный вход приемника. Оказалось, что суммарная относительная нестабильность частоты двух используемых рубидиевых стандартов на интервале времени от 1 часа до 1 суток не превышала значения  $1.5 \times 10^{-11}$ .





Рис.4. Амплитудная характеристика канала измерения уровня сигнала.



Дальнейшая обработка зарегистрированных вариаций фазы  $\Psi$  и амплитуды A полного сигнала заключается в разделении его на неизменный (в первом приближении) сигнал земной волны (с амплитудой  $A_E$  и, для определенности, нулевой фазой) и вариации параметров ионосферного сигнала (фазы  $\Phi$  и амплитуды  $A_i$ ). Рассматривая векторное представление полного сигнала в виде  $\vec{A} = \vec{A}_E + \vec{A}_i$  на координатной плоскости (рис. 6-*a*), можно записать следующую систему тригонометрических уравнений, связывающих измеряемые и искомые параметры:  $A \sin \Psi = A_i \sin \Phi$ ,  $A \cos \Psi = A_E + A_i \cos \Phi$ .



Рис.6. Векторные диаграммы, поясняющие методику определения параметров земной и ионосферной волны.



Рис.7. Суточные вариации фазы в градусах (верхняя панель) и амплитуды в относительных единицах (нижняя панель) полного (черные кривые) и ионосферного (зеленые кривые) сигнала станции РБУ в эксперименте 24.09.2013. Красная кривая – амплитуда земной волны.

Неизвестную в общем случае амплитуду земной волны А<sub>Е</sub> можно определить в периоды восхода и заката, когда имеет место сравнительно быстрое значительное изменение высоты отражения ионосферной волны И имеются моменты противоположной направленности векторов  $\vec{A}_E$  и  $\vec{A}_i$ . Векторные диаграммы подобных моментов представлены на рис. 6- $\delta$  (в случае  $|A_E| > |A_i|$ ) и рис. 6- $\delta$  (в обратном случае). При этом временной ход  $\Psi$  в первом случае имеет характерный вид кривой с двумя экстремумами противоположных знаков и размахом 2 $\Delta\Psi$ <180°. Во втором случае экстремумы отсутствуют, а полная вариация фазы превышает 180°. Во временном ходе А в обоих случаях наблюдается минимум. Приняв, что в момент минимума А значение  $\Psi=0^{\circ}$  в первом случае и  $\Psi=180^{\circ}$  – во втором, величина  $|A_{E}|$  может быть определена по данным измерений b = A в момент  $\Psi = \pm \Delta \Psi$  для первого случая и c = A в момент  $\Psi = \pm 90^{\circ}$ для второго. Выражения для вычислений имеют вид (см. рис. 6-б, 6-е):  $A_E = (a^2 + b^2)/2a$  и  $A_E = (c^2 - a^2)/2a$  в первом и втором случае соответственно. Здесь *a* – значение *A* в минимуме.

Пример регистрации сигнала станции РБУ в эксперименте 24.09.2013 и результаты ее обработки по изложенной выше методике приведены на рис. 7. Эквивалентное изменение высоты отражения ионосферной волны ото дня к ночи для данной радиотрассы достигало приблизительно  $12 \div 15$  км. Днем  $A_i$  в  $4 \div 6$  раз меньше ночных значений. Квазипериодические (с периодом  $70 \div 75$  мин) вариации  $\Phi$  в дневное время свидетельствуют о присутствии на высотах области отражения акустикогравитационных волн.

# ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ВАРИАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЯ F1 ИОНОСФЕРЫ

#### Т.Г. Живолуп

Институт ионосферы НАН и МОН Украины Украина, г. Харьков, 61002, ул. Краснознаменная 16, Радиофизический корпус, E-mail: <u>iion@kpi.kharkov.ua</u>

Одной из важнейших задач теории и моделирования нижней части области F ионосферы, состоящей из различных ионов, является разработка таких моделей, которые достоверно отражают ее поведение при разных гелиогеофизических условиях. Особый интерес представляет поведение слоя F1 и межслоевой впадины F1-F2. Четкие представления о механизмах образования слоя F1 и межслоевой впадины F1-F2 необходимы для успешного прогнозирования состояния нижней части области F ионосферы, которая играет значительную роль в распространении радиоволн. Поэтому создание надежной теоретической модели нижней части области F ионосферы и изучение поведения слоя F1 при разных гелиогеофизических условиях, особенно в зависимости от относительной концентрации атомарного кислорода, представляет интерес как для фундаментальных исследований, так и для решения прикладных задач геофизики и распространения радиоволн.

Для исследования вариаций относительной концентрации иона атомарного кислорода в зависимости от уровня солнечной активности (СА) и их связи с высотой максимума слоя F1 и параметрами межслоевой впадины F1-F2 была разработана теоретическая модель ионосферы для высот 100 – 200 км.

Теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100 – 200 км. Разработанная автором теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100 – 200 км использует данные модели MSIS-86 для концентраций нейтральных частиц на высотах 100 – 200 км для конкретного дня и уровней солнечной и магнитной активности. Эти данные берутся как входные для вычисления высотного распределения нейтральных частиц. Предлагаемая модель также может использовать соотношения модели нейтральной атмосферы Яккия-71 [1].

Разработанная теоретическая модель включает основные ионно-обменные реакции и реакции диссоциативной рекомбинации и уточненные значения их скоростей, приведенные в [2]. Модель учитывает ионизацию нейтральной атмосферы солнечным излучением и определяет из условий ионизационно-рекомбинационного равновесия концентрацию электронов  $n_e$  и концентрации ионов NO<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sup>+</sup> и N<sub>2</sub><sup>+</sup>.

Модель использует девятиинтервальный спектр коротковолнового солнечного излучения, приведенный в [3], и зависимость интенсивности коротковолнового излучения Солнца от значения индекса  $F_{10,7}$  из работы [4].

Предложенная модель учитывает следующие основные ионно-обменные реакции:

$$O^+ + N_2 \xrightarrow{\gamma_1} NO^+ + N, \quad O^+ + O_2 \xrightarrow{\gamma_2} O_2^+ + O,$$

$$O_2^+ + N ({}^4S) \xrightarrow{\gamma_3} NO^+ + O, \quad O_2^+ + N_2 \xrightarrow{\gamma_4} NO^+ + NO,$$

$$N_2^+ + O \xrightarrow{\gamma_5} NO^+ + N (^2D), N_2^+ + O_2 \xrightarrow{\gamma_6} O_2^+ + N_2,$$

и две реакции диссоциативной рекомбинации:

$$NO^+ + e \xrightarrow{\alpha_1} N + O, \quad O_2^+ + e \xrightarrow{\alpha_2} O(^1D) + O,$$

где  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ ,  $\gamma_4$ ,  $\gamma_5$ ,  $\gamma_6$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – скорости реакций.

Система уравнений баланса ионизации в стационарном случае имеет следующий вид:

$$0 = q_1 - [N_2^+] \{\gamma_5[O] + \gamma_6[O_2]\},$$
  

$$0 = q_2 - [O^+] \{\gamma_1[N_2] + \gamma_2[O_2]\},$$
  

$$0 = q_3 - [O_2^+] \{\gamma_3[N] + \gamma_4[N_2]\} - \alpha_2[O_2^+]n_e + \gamma_2[O_2][O^+] + \gamma_6[O_2][N_2^+],$$
  

$$0 = [O_2^+] \{\gamma_3[N] + \gamma_4[N_2]\} - \alpha_1[NO^+]n_e + \gamma_1[N_2][O^+] + \gamma_5[O][N_2^+],$$
  

$$n_e = [NO^+] + [O_2^+] + [N_2^+] + [O^+].$$

Скорости ионизации  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  определяются путем ионизации N<sub>2</sub>, O, O<sub>2</sub> девятиинтервальным спектром коротковолнового солнечного излучения, приведенным в [3].

Система уравнений баланса ионизации сводится к кубическому уравнению относительно *n<sub>e</sub>*:

$$n_e^{3} + bn_e^{2} + cn_e + d = 0, (1)$$

Уравнение (1) имеет три действительных корня (положительный и два отрицательных), потому что его дискриминант меньше нуля.

Так как у уравнения (1) – только один положительный корень, а на высотах 100 – 200 км  $n_e > 0$ , то решением уравнения (1) будет этот положительный корень.

В результате решения уравнения (1) были рассчитаны модельные профили  $n_e(h)$ , а из системы уравнений – высотные профили концентрации ионов O<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, NO<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> в интервале высот 100 – 200 км для конкретных гелиогеофизических условий.

**Результаты расчетов.** Были проведены расчеты относительной концентрации иона атомарного кислорода в нижней части области F ионосферы в зависимости от уровня CA. Для этого была использована теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100 – 200 км.

Для исследования влияния солнечной активности на поведение относительной концентрации иона атомарного кислорода был выбран период летнего солнцестояния и уровни СА  $F_{10,7} = 70, 100, 140, 170$  и 200. Исследования были проведены для высот 140, 150, 160, 170, 180, 190 и 200 км.

Теоретические расчеты показали, что при возрастании уровня солнечной активности относительная концентрация иона атомарного кислорода увеличивается на всех выбранных высотах. Так, на высоте 140 км при возрастании уровня солнечной активности  $F_{10,7}$  от 70 до 140 относительная концентрация иона атомарного кислорода увеличилась в 2,03 раза, на высоте 150 км – в 1,92 раза, на высоте 160 км – в 1,77 раза, на высоте 170 км – в 1,63 раза, на высоте 180 км – в 1,50 раза, на высоте 190 км – в 1,37 раза, на высоте 200 км – в 1,25 раза.

Как видно из приведенных значений, при возрастании уровня солнечной активности  $F_{10,7}$  от 70 до 140 увеличение относительной концентрации иона атомарного кислорода убывает с ростом высоты. При возрастании уровня СА  $F_{10,7}$  от 140 до 200 относительная концентрация ионов атомарного кислорода также увеличивается на всех выбранных высотах. Так, на высоте 140 км относительная концентрация иона атомарного кислорода увеличилась в 1,2 раза, на высоте 150 км – в 1,18 раза, на высоте 160 км – в 1,15 раза, на высоте 170 км – в 1,11 раза, на высоте 180 км – в 1,08 раза, на высоте

190 км – в 1,05 раза, на высоте 200 км – в 1,01 раза. Как видно из приведенных значений, при возрастании уровня СА  $F_{10,7}$  от 140 до 200 увеличение относительной концентрации ионов атомарного кислорода также убывает с ростом высоты.

Таким образом, увеличение относительной концентрации ионов атомарного кислорода на высотах 140–200 км более существенное при возрастании уровня СА  $F_{10,7}$  от 70 до 140.

Для исследования влияния СА на формирование слоя F1, поведение высоты его максимума, а также на параметры межслоевой впадины F1-F2 были проведены расчеты высотных профилей концентрации электронов по разработанной теоретической модели ионосферы для интервала высот 100 – 200 км.

Расчеты показали, что при возрастании индекса СА  $F_{10,7}$  от 70 до 200 возрастает и высота максимума слоя F1. При увеличении индекса СА  $F_{10,7}$  от 70 до 140 высота максимума слоя F1 увеличивается от 144 до 165 км (на 21 км). Зависимость высоты максимума слоя F1 от индекса  $F_{10,7}$  близка к линейной при изменении индекса  $F_{10,7}$  от 70 до 140.

При дальнейшем росте индекса СА  $F_{10,7}$  наблюдается медленный рост высоты максимума слоя F1. Так при изменении индекса СА  $F_{10,7}$  от 140 до 200 высота максимума слоя F1 возрастает от 165 до 167 км (на 2 км).

Расчеты показали, что при возрастании индекса СА  $F_{10,7}$  от 70 до 140 высота минимума межслоевой впадины F1-F2  $h_{\nu}$ F1 и ее ширина *D* быстро уменьшаются, а зависимости  $h_{\nu}$ F1( $F_{10,7}$ ) и  $D(F_{10,7})$  близки к линейным.

Таким образом, с помощью разработанной теоретической модели ионосферы для интервала высот 100 – 200 км установлено, что на высотах 140 – 200 км более существенное и быстрое увеличение относительной концентрации иона атомарного кислорода наблюдается при возрастании уровня СА  $F_{10,7}$  от 70 до 140. Это приводит к быстрому возрастанию высоты максимума слоя F1 и к быстрому уменьшению высоты минимума и ширины межслоевой впадины F1-F2. Оказалось, что зависимости  $h_{\nu}F1(F_{10,7})$  и  $D(F_{10,7})$  близки к линейным.

Выводы. 1. Разработанная теоретическая модель ионосферы для интервала высот 100 – 200 км позволила рассчитать высотное распределение электронной концентрации и относительной концентрации атомарного кислорода в интервале высот 100 – 200 км и исследовать поведение высоты максимума слоя F1 и межслоевой впадины F1-F2 в зависимости от солнечной активности.

2. При возрастании уровня СА относительная концентрация иона атомарного кислорода на высотах 140 – 200 км возрастает, что приводит к увеличению высоты максимума слоя F1 и к уменьшению высоты минимума и ширины межслоевой впадины F1-F2, причем более существенное и быстрое увеличение относительной концентрации иона атомарного кислорода наблюдается при возрастании уровня солнечной активности  $F_{10,7}$  от 70 до 140.

### Литература

 Jacchia L.G. Revised static models of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles // Spec. Rep. N 332. Smithson. Astrophys. Observ., Cambridge, Mass. - 1971.

- 2. Антонова Л.А, Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. Аэрономия слоя Е (учет вариаций УФ-излучения Солнца и геомагнитных возмущений). М.:Янус, 1996. 168 с.
- 3. *Stubbe P*. The thermosphere and the F-region a reconciliation of theory with observations. – Ionospheric Research Sci. Rep. N 418. Penn. State University. – 1973. – 156 p.
- 4. *Иванов-Холодный Г.С., Фирсов В.В.* Спектр коротковолнового излучения Солнца при различных уровнях активности // Геомагнетизм и аэрономия. 1974. 14, № 3. С. 393 398.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В F2-ОБЛАСТИ

### С.В. Гринченко, Д.А. Дзюбанов

Институт ионосферы, Украина, Харьков, 61002, ул. Краснознаменная, 16, svgrinchenko@gmail.com, dzyubanov@gmail.com

Динамика верхней атмосферы является одной из важнейших проблем геокосмоса. Это относится как к динамике нейтральной составляющей, так и к динамике ионосферы. При этом следует отметить, что динамика нейтральной составляющей определяется, в основном, приливными силами, вызываемыми нагревом солнечным излучением и, в незначительной степени, лунными приливами. Динамика же ионизированной составляющей включает в себя увлечение плазмы движущейся нейтральной атмосферой, но к этому движению добавляются процессы диффузионного переноса плазмы и ее дрейф в скрещенных электрическом и геомагнитном полях. Электрическое поле, обеспечивающее этот дрейф, генерируется в динамо-области и переносится в верхнюю атмосферу.

Если иметь в виду то, что ось магнитного диполя наклонена под углом 11,5 градусов к оси вращения Земли, то можно говорить об отсутствии осевой симметрии как в динамике ионосферной плазмы, так и в глобальном распределении электронной концентрации. То есть, картина глобальной циркуляции ионосферной плазмы оказывается гораздо сложнее аналогичной картины для нейтральной компоненты. Поэтому в настоящее время предложены и используются модели горизонтальных ветров нейтральной компоненты HWM93 и HWM07 [1, 2]. В докладе приведены примеры расчетов термосферного ветра по модели HWM93 для координат Харькова и различных условий. Поскольку радар некогерентного рассеяния Института ионосферы позволяет успешно определять вертикальную скорость движения плазмы, то наблюдательные данные при соответствующей обработке могут использоваться для тестирования моделей термосферных ветров. С другой стороны, вертикальная компонента скорости движения плазмы может быть рассчитана теоретически, при решении уравнения непрерывности для ионосферной плазмы [3], учитывающего процессы ионообразования, рекомбинации и переноса. При этом в расчетах используются модельные представления о высотных распределениях нейтральных частиц, скоростях ионообразования, рекомбинации, процессов диффузии, а также о термосферных ветрах. Критерием же правильности расчета является сопоставление рассчитанных профилей электронной концентрации с результатами наблюдений методом некогерентного рассеяния. Приводятся результаты расчетов профилей различных гелиогеофизических электронной концентрации лля условий с использованием упомянутых модельных представлений. Таким образом, представляемые результаты являются определенным этапом более объемной работы по анализу динамики ионизированной и нейтральной компонент верхней атмосферы, в частном случае, над Харьковом. В дальнейшем предполагается сопоставление вертикальной скорости переноса плазмы, полученной как в результате расчета, так и экспериментально, а также будет проведено вычисление термосферных ветров по данным некогерентного рассеяния и сопоставление их с моделью HWM93, как более подходящей для описания динамики среднеширотной верхней атмосферы.

Расчет вертикальной скорости плазмы и распределения электронной концентрации осуществляется в рамках общей схемы. Поэтому можно утверждать, что если расчетные профили электронной концентрации согласуются с результатами

наблюдений и, таким образом, отвечают существующим представлениям о морфологии среднеширотной ионосферы (сезонно-суточным и циклическим вариациям), то и рассчитанные значения скорости также соответствуют этим представлениям.

## Литература

- 1. A. E.Hedin et al. «Empirical Wind Model for the Upper, Middle and Lower Atmosphere»,
- J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 58, P. 1421-1447 -, 1996.
- 2. D. P. Drob et al. «An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07», J. Geophys. Res. Vol. 113. A12304, doi:10.1029/2008JA013668 18 p., 2008.
- 3. Г.С. Иванов-Холодный, А.В. Михайлов, «Прогнозирование состояния ионосферы», Гидрометеоиздат, Ленинград, 1980.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНАЯ МЕЗОСФЕРА И ТРОПОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫЕ СВЯЗИ

#### С.И. Мартыненко

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы 4, e-mail: Sergey.I.Martynenko@univer.kharkov.ua

Введение. Мезосферные электродинамические процессы существенно влияют на работу систем радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиометеорологии, аэрокосмических систем и электрических сетей энергообеспечения, а также они связаны с различными крупномасштабными и глобальными явлениями в околоземной среде, включая глобальные климатические изменения. Открытие с помощью прямых ракетных измерений существования в мезосфере собственных мощных электрических полей

(с напряженностями поля E до 1 – 10 В/м) [1–3] привело к необходимости пересмотра и уточнения моделей электродинамических процессов в глобальной атмосферной электрической цепи [4–6]. При явном недостатке экспериментальных данных об основных характеристиках мощных мезосферных электрических полей (ММЭП) существует необходимость в развитии дистанционных методов диагностики электрически активной мезосферы и в создании соответствующих моделей атмосферного взаимодействия.

Основные результаты экспериментов. Получение характеристик электрически активной мезосферы проводилось с привлечением многолетних (1978 -2010 гг.) регистраций сигналов на радиотехническом комплексе частичных отражений в радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина (пос. Гайдары Харьковской обл.). При этом использовались сигналы со следующими параметрами: рабочие частоты – 1,8 – 3,0 МГц, длительность зондирующих импульсов – 25 мкс, частота повторения импульсов – 1 Гц, преобладающий высотный диапазон частично отраженных (ЧО) сигналов – 60 – 66 км. Анализировались также результаты экспериментальных регистраций ЧО сигналов, полученные на СЧ радаре Institute of Space and Atmospheric Studies (ISAS), University of Saskatchewan, Canada (беспрерывные измерения за 1979 – 1981 гг. с высот 61 – 67 км, длительность зондирующих импульсов 20 мкс, рабочая частота 2,2 МГц) [6-8].

Разработанный на кафедре космической радиофизики ХНУ имени В. Н. Каразина метод дистанционной диагностики характеристик ММЭП, а также параметров возмущенной плазмы нижней ионосферы основан на полученной нами детерминированной связи напряженности этих полей с величиной возмущенной эффективной частоты соударений электронов в области D ионосферы [6-8]. Сама же эффективная частота соударений дистанционно измеряется при помощи регистрации частично отраженных в области D радиосигналов. Суммарная минимальная ошибка предложенного метода составляет около 20%, конкретные ж значения ошибок уточнялись в каждом конкретном эксперименте. Статистический анализ полученных результатов показал, что в мезосфере существуют, по крайней мере, два механизма генерации ММЭП, наиболее вероятным из которых (с вероятностью 60-70%) может интерференция случайных ОТ большого быть полей числа элементарных мелкомасштабных мезосферных генераторов, что приводит к однопараметрическому Релеевскому распределению результирующей напряженности ММЭП со средними значениями 0,7–0,9 В/м. Вероятность отсутствия региональных ММЭП составила около 25% для Украины и около 30% для Канады.

Исследовались также усредненные суточные распределения изменений напряженности ММЭП в зависимости от мирового времени (UT) для Харьковского региона (265 сеансов измерений, средняя продолжительность сеанса 10 минут) и для региона центральной Канады (Institute of Space and Atmospheric Studies (ISAS), University of Saskatchewan, Canada, 170 сеансов измерений, средняя продолжительность сеанса

15 минут). Было обнаружено наличие двух максимумов средней напряженности ММЭП: утренний в интервале 04h–06h UT и дневной в интервале 14h–16h UT. Интересно, что подобные зависимости для приземного электрического поля (кривые Карнеги) с двумя максимумами соответствуют континентальным летним геофизическим условиям, а также условиям над промышленными регионами [4, 9]. Это может свидетельствовать о существовании общих факторов влияния как на ММЭП, так и на приземные электрические поля, включая и возможное влияние промышленной деятельности человека.

Механизм тропосферно-мезосферного взаимодействия. Новые возможности объяснения механизма быстрого тропосферно-мезосферно-ионосферного для взаимодействия в возмущенных условиях открывает учет влияния на эти процессы ММЭП [5]. При этом основными атмосферными электрическими элементами являются следующие: источник мезосферного тока с плотностью  $j_m \sim 10^{-8} - 10^{-9}$  А/м<sup>2</sup>, который вызывает, в первую очередь, возмущения температуры и эффективной частоты соударений электронов по сравнению с общепринятыми фоновыми значениями; сопротивление (тропосферно-стратосферное) мезосферное приземное  $R_t$ : сопротивление нагрузки R<sub>m</sub> для мезосферного источника; внешнее сопротивление глобального слоя атмосферы между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы  $R_a \approx 200$  Ом. В невозмущенных атмосферных условиях плотность тока "ясной" погоды  $j_a \sim 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup> и  $j_m >> j_a$ , поэтому при наличии  $j_m$  величиной  $j_a$  можно пренебрегать. В невозмущенных условиях  $R_t >> R_m >> R_a$ , а полное сопротивление нагрузки мезосферного источника будет  $R_i = R_m R_t / (R_m + R_t) \approx R_m$ , т. е. электрические тропосферно-мезосферные связи практически не проявляются, значения же температуры и эффективной частоты соударений электронов поддерживаются за счет мощных мезосферных электрических полей на повышенном уровне.

При возникновении больших возмущений тропосферной проводимости соотношение между величинами  $R_t$  и  $R_m$  изменяется, что отражается и на величине  $R_i$ . Например, при уменьшении  $R_t$  до двух порядков  $R_t << R_m$ , а  $R_i \approx R_t$ . Тогда разность потенциалов U в мезосфере, определяющая напряженность ММЭП E, становится зависимой от  $R_t$ . Уменьшение  $R_i$  и  $R_t$  приводит к соответствующему уменьшению E и, как следствие, к уменьшению температуры электронов *T<sub>e</sub>* в мезосфере при увеличении проводимости тропосферы. Таким образом, "короткое замыкание" мезосферного источника электричества на значительно уменьшившееся тропосферное сопротивление приводит к "охлаждению" электронов в области D ионосферы. что в предельном случае способствует переходу этой области ионосферы из неизотермического состояния в изотермический (то есть средние температуры электронов, ионов и нейтральных частиц становятся равными). В целом же наличие ММЭП приводит к формированию тропосферно-мезосферных дополнительных электродинамических связей R возмущенных условиях, что должно находить отражение при развитии модели глобальной атмосферной электрической цепи [4, 5].

Таким образом, предлагаемый малоинерционный механизм тропосферномезосферно-ионосферного взаимодействия при наличии ММЭП может играть важную роль в процессах развития и распространения возмущений в нижней ионосфере, вызываемых мощными естественными и искусственными источниками возмущений тропосферной проводимости (землетрясения, аварии на АЭС с выбросами радиоактивных веществ, старты космических аппаратов, разнообразные антропогенные загрязнения атмосферы и т.п.).

## Литература

- 1. Ю.А. Брагин, А.А. Тютин, А.А. Кочев, "Прямые измерения напряженности электрического поля атмосферы до 80 км", Космические исследования, Т. 12, вып. 2, сс. 306 308, 1974.
- 2. R.A. Goldberg, "Middle atmospheric electrodynamics during MAP", Adv. Space Res., Vol. 10, No. 10, pp. 209 217, 1990.
- 3. A.M. Zadorozhny, A.A. Tyutin, "Effects of geomagnetic activity on the mesospheric electric fields", Ann. Geophys., Vol. 16, No. 12, pp. 1544 1551, 1998.
- 4. M.J. Rycroft, "Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: An overview", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., Vol. 68, pp. 445–456, 2006.
- 5. S.I. Martynenko, S.F. Clifford, "On the electrical coupling between the troposphere and the mesosphere", International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 6, pp. 1–6, 2007.
- A.H. Manson, C.E. Meek, S.I. Martynenko, V.T. Rozumenko, O.F. Tyrnov, "VLF Phase Perturbations Produced by the Variability in Large (V/m) Mesospheric Electric Fields in the 60–70 km Altitude Range", Characterising the Ionosphere. Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Fairbanks, Alaska, USA, 12–16 June 2006, pp. 8-1–8-24, 2006.
- 7. С.И. Мартыненко, "Методика дистанционной диагностики ионосферных возмущений в мощном мезосферном электрическом поле", Радиофизика и радиоастрономия, Т.8, № 2, сс. 127–136, 2003.
- C.E. Meek, A.H. Manson, S.I. Martynenko, V.T. Rozumemko, O.F. Tyrnov, "Remote sensing of mesospheric electric fields using MF radar", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., Vol. 66, pp. 881–890, 2004.
- 9. H. Volland, "Atmospheric electrodynamics", Springer-Verlag, Berlin, 1984.

# РАЗДЕЛЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ

Н.Н. Калиниченко<sup>1</sup>, И.С. Фалькович<sup>1</sup>, А.А. Коноваленко<sup>1</sup>, А.И. Браженко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Радиоастрономический институт НАН Украины Украина, Харьков, 310002, ул.Краснознаменная, 4, <u>kalinich@rian.kharkov.ua</u>
<sup>2</sup>Гравиметрическая обсерватория Института геофизики НАН Украины Украина, Полтава, 36029, ул. Мясоедова,27/29,

При наблюдениях мерцаний космических источников флуктуации интенсивности сигнала содержат вклад как межпланетной среды, так и ионосферы Земли. До настоящего времени существовала лишь спектральная методика разделения межпланетных и ионосферных мерцаний Наблюдения на нескольких разнесенных радиотелескопах с использованием ультрасовременных спектральных анализаторов DSP-z позволяют решить эту задачу по-новому.

Цель работы - экспериментальная оценка влияния ионосферы Земли на статистические характеристики мерцаний компактных космических источников в декаметровом диапазоне радиоволн (кросс - корреляционную функцию мерцаний на двух частотах; кросс - корреляционную функцию мерцаний на разнесенных радиотелескопах; энергетический спектр мерцаний; плотность распределения мерцаний), разработка новой вероятностей а также методики разделения межпланетных и ионосферных мерцаний.

В период с 21 по 28 января 2013 года на двух радиотелескопах УТР-2 (Граково) и УРАН-2 (Полтава) (база 152 км) была проведена сессия синхронных наблюдений космических радиоисточников 3С144, 3С196 и 3С274 с использованием спектральных анализаторов DSP-z.

Обработка и анализ данных наблюдений позволили сделать следующие выводы.

1. При слабом влиянии ионосферы Земли имеет место хорошее согласие между статистическими характеристиками мерцаний, определяемыми на разнесенных радиотелескопах.

2. Радиус частотной и пространственной корреляций межпланетных мерцаний на декаметровых радиоволнах превышает 8 МГц и 150 км соответственно.

3. Статистические характеристики как сильных, так и слабых ионосферных мерцаний отличаются от таковых для слабых межпланетных мерцаний (кросс - корреляционные функции мерцаний на двух частотах; кросс - корреляционные функция мерцаний на двух разнесенных радиотелескопах; энергетические спектры мерцаний; плотности распределения вероятностей мерцаний).

4. Величина искажений характеристик межпланетных мерцаний определяется степенью влияния ионосферы. Практически наблюдается, в той или иной пропорции, сумма двух характеристик, каждая из которых описывает вклад одной из сред.

5. При обработке данных мерцаний использование статистических характеристик позволяет количественно описать степень влияния ионосферы. Реализации с существенным вкладом ионосферы обнаруживаются:

- о по наличию подъема в спектре мерцаний (на частотах мерцаний меньше 0.04 Гц),
- по широкой (десятки секунд по нулевому уровню) кросс корреляционной функции мерцаний на двух частотах;
- низкой меньше 0.7 пространственной корреляции мерцаний;
- негауссовской плотности распределения вероятностей мерцаний.



Рис. 1. Динамические спектры мерцаний в условиях слабого влияния ионосферы Земли в обоих пунктах наблюдений. Синхронная запись радиоисточника 3С144 (а - УТР-2, б - УРАН-2)



Рис.2. Динамические спектры в условиях сильных ионосферных мерцаний на радиотелескопе УТР-2 и слабого влияния ионосферы Земли на радиотелескопе УРАН-2. Синхронная запись радиоисточника 3С196 (а - УТР-2, б - УРАН-2)

# ВОЗМУЩЕНИЯ СРЕДНЕШИРОТНОЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫЕ ПОТОКАМИ МЕТЕОРОВ

### А. М. Гоков, О. Ф. Тырнов

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы 4 *men.:* 057-7051251, *e-mail: amg* 1955@mail.ru

### Введение

В настоящее время проводятся интенсивные исследования пылевой плазмы. Важными являются исследования в области физики пылегазовых облаков в атмосфере и ионосферной плазме. Одним из источников пыли в ионосфере на высотах z = 70 - 120км являются метеорные потоки. Максимум концентрации метеорных пылевых частиц приходится на высоты 80 – 90 км и составляет более 10<sup>4</sup> см<sup>-3</sup> [1, 2]. Заряженные пылевые частицы в нижней ионосфере существенно влияют на её ионизационные свойства [3] и на волновые процессы в запылённой ионосферной плазме. В [4, 5] показано, что движение с большой скоростью заряженных мелкодисперсных пылевых частиц во время интенсивных метеорных потоков (характерный размер частиц составляет порядка нескольких десятков нанометров) приводит к возможности существования на высотах нижней ионосферы низкочастотных пылевых звуковых возмущений. Характерная амплитуда электростатических колебаний в пылевых звуковых волнах может намного превышать величину 10 В, что приводит к возможности генерации интенсивных инфразвуковых волн в диапазоне частот от нескольких десятых до нескольких десятков Гц с амплитудой колебаний, сопоставимой со значениями невозмущённого давления атмосферы на высотах 70 - 130 км [6]. У поверхности Земли они могут преобладать над инфразвуковыми колебаниями от других источников. Поэтому исследование возможности генерации инфразвуковых колебаний пылевыми звуковыми возмущениями в запылённой ионосферной плазме и их наблюдения у поверхности Земли представляет несомненный интерес и является актуальным. Для изучения явлений, возникающих в нижней ионосфере, наиболее часто применяется метод частичных отражений (ЧО) (см., напр., [7]). Обусловлено это приемлемой точностью получения сведений о высотно-временных вариациях параметров ионосферы и радиошумов, возможностью проводить непрерывные длительные (десятки часов – сутки) наблюдения с временным разрешением единицы секунд – единицы минут и разрешением по высоте 1,5 – 3 км. Как известно, естественные возмущения имеют широкий диапазон продолжительности: единицы секунд – десятки часов.

В настоящей работе рассматриваются результаты экспериментального исследования возможного отклика среднеширотной нижней ионосферы в периоды метеорных потоков а также вариации характеристик частично отраженных сигналов и радиошумов в эти периоды, полученные методом ЧО с помощью аппаратуры ХНУ имени В. Н. Каразина [7] в период 2000 – 2012 гг. вблизи г. Харькова.

## Основные результаты и их обсуждение

Временные изменения концентрации электронов N(z,t) на разных высотных уровнях в среднеширотной нижней ионосфере и вариации характеристик ЧО-сигналов и радиошумов на частотах 2,2 и 2,31 МГц изучались в периоды метеорных потоков Геминиды (один из самых ярких метеорных потоков) в декабре 2006 и 2009 гг. и Леониды (знамениты сильными метеорными дождями) в ноябре 2000 и 2001 гг.

Измерения характеристик ЧО-сигналов и радиошумов выполнялись, как правило, непрерывно суточными циклами в декабре 2006 г: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22 и 25; в декабре 2009 г: 9, 14, 15, 16, 17; в ноябре 2000 г.: 1, 8, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 и 29; в ноябре 2001 г.: 7, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 26, 28, 29, и 30.

Основные параметры метеорных потоков приведены в таблице.

,	Геминиды	Леониды
Период активности	7-17 декабря	13-21 ноября
Максимум активности	14 декабря	17–18 ноября
Зенитное часовое число	120	480-3500
Наблюдаемая скорость	35 км/с	71 км/с
Максимум потока, LT	~ 02.00	00-03.00

Таблица. Основные параметры метеорных потоков

Анализировались высотно-временные регистрации амплитуд ЧО сигналов и радиошумов, полученные в темное время суток, и изменения концентрации электронов *N* в нижней ионосфере (значения *N* вычислялись с погрешностью, не превышающей 30%, с использованием методики [8]). Проводилось также визуальное наблюдение метеорных потоков в не ясные дни.

Анализ экспериментальных данных показал, что основные особенности высотно-временных измене-ний амплитуд частично отраженных сигналов  $A_{o,x}(z t)$ , шумов  $A_{nox}(t)$  и N(z, t) для всех рассмотренных экспериментов сводятся к следующему:

1) в периоды максимального поступления пылевых частиц метеорного происхождения в ионосферную плазму нестационарность ЧО сигналов и радиошумов заметно больше, чем в периоды до и после;

2) в рассмотренных случаях выявлены некоторые различия в поведении  $A_{o,x}(z,t)$  и  $A_{nox}(t)$  во время наибольшей интенсивности метеорных потоков в отличие от времени до и после них и в контрольные дни (когда потоки метеоров отсутствовали): наблюдаются квазипериодические изменения  $A_{o,x}(z,t)$  и  $A_{nox}(t)$  в течение десятков минут. При этом имело место перемещение этого процесса по высоте. Анализ первичных регистраций ЧО сигналов показал, что скорость перемещения процесса составляла ~ 330 – 350 м/с. Спектральной обработкой экспериментальных данных установлено заметное увеличение энергии на частотах 2 и 5 Гц, что соответствует инфразвуковому диапазону. Отметим, что в фоновых измерениях в контрольный день подобных изменений не отмечено. Полученные данные подтверждают результаты теоретических и экспериментальных исследований [6], указывающих на то, что возбуждение пылевых звуковых возмущений в периоды интенсивных метеорных потоков приводит к генерации инфразвуковых колебаний, которые в диапазоне частот от нескольких десяткых десятков Герц, у поверхности Земли могут превалировать над инфразвуковыми колебаниями от других источников;

3) в периоды максимального метеорного потока в ночной среднеширотной Dобласти ионосферы на высотах z > 85 км наблюдался эпизодический рост длительностью единицы-десятки минут значений концентрации электронов более, чем на 50 – 100 % в сравнении с контрольными днями; 4) в нижней части среднеширотной D-области ионосферы (z < 85 км) заметных различий по сравнению с контрольными периодами в поведении  $A_{o,x}(z t)$ , шумов  $A_{nox}(t)$  и N(z, t) не установлено.

#### Заключение

Экспериментально изучены особенности высотно-временных изменений амплитуд частично отраженных сигналов  $A_{o,x}(z,t)$ , радиошумов  $A_{no,x}(z,t)$  и концентрации электронов N(z) в ночной среднеширотной D-области ионосферы во время метеорных потоков Геминиды в декабре 2006 и 2009 гг. и Леониды в ноябре 2000 и 2001 гг. Установлено, что в периоды максимального поступления пылевых частиц метеорного происхождения в ионосферную плазму наблюдаются квазипериодические изменения  $A_{o,x}(z,t)$  и  $A_{no,x}(z,t)$  в течение десятков минут, обусловленные, по-видимому, движением заряженных мелкодисперсных пылевых частиц, связанным с ним генерацией инфразвуковых волн. Установлено также, что в эти периоды в ночной среднеширотной D-области ионосферы на высотах z > 80 км наблюдается эпизодический рост длительностью единицы-десятки минут значений электронной концентрации более, чем на 50 – 100 % в сравнении с контрольными днями. Механизм такого поведения N(z,t) представляется в воздействии пылевых частиц метеорного происхождения на ионосферную плазму и обусловлен эффектами зарядки и динамики пылевых частиц.

## Литература

- 1. Musatenko S.I., Musatenko Yu.S., Kurochka E.V., Lastochkin A.V., Cholij V.Ya., Maksimenko O.I., Slipchenko A.S. Dusty plasma in the midlatitude ionosphere during meteor showers. *Geomanetism and aeronomy* 2006, Vol. 46, No. 2, pp. 182–192.
- Kopnin S. I., Kosarev I. N., Popel S. I., Yu M. Y. Localized Structures of Nanosize Charged Dust Grains in Earth's Middle Atmosphere. *Planetary and Space Science*, 2004, Vol. 52, pp. 1187–1194.
- 3. Kalashnikova O., Horanyi M., Thomas G.E., Toon O. B. Meteoric smoke production in the atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 2000, Vol. 27, No. 20, pp. 3293–3296.
- 4. Kopnin S. I., Popel S. I., M. Y. Yu. Modulational excitation of low-frequency dust acoustic waves in the Earth's lower ionosphere. *Fiz. Plasmy*, 2007, Vol. 33, No. 4. C. 323–336.
- 5. Kopnin S. I., Popel S. I. Generation of infrasound oscillations by low frequency dusty acoustic disturbances in the Earth's lower ionosphere. *Fiz. Plasmy*, 2008 Vol. 34, No. 6, pp. 517–526.
- 6. Kopnin S. I. Pylevye zvukovye vozmuscheniya v zapylyennoi ionosfernoi plazme i ih proyavleniya: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk Dust sound disturbances in a dusty ionospheric plasma and their manifestation: candidate's dissertation]. Moscow, 2008. 119 p.
- Tyrnov, O. F., Garmash K. P., Gokov A. M., Gritchin A. I., Dorohov V. L., Kontzevaya L. G., Kostrov L. S., Leus S. G., Martynenko S. I., Misyura V. A., Podnos V. A., Pokhilko S. N., Rozumenko V. T., Somov V. G., Tsymbal A. M., Chernogor L. F., Shemet A. S. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere. *Turkish Journal of Physics*, 1994, Vol. 18, No. 11, pp. 1260–1265.
- 8. Garmash K. P. Regulyarizatsiya obratnoi zadachi v metode chastichnyh otrazhenii [Regularization of the inverse problem in the differential absorption experiment]. *Vestnik Kharkovskogo Universiteta. Radiofizika i elektronika*, 1991, No. 355, pp. 61-64.

# ВАРИАЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ

## С.И. Мартыненко, О.Ф. Тырнов, В.Т. Розуменко

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы 4, *тел.: 057-7051251, e-mail: <u>Oleg.F.Tyrnov@univer.kharkov.ua</u>* 

#### Введение

Открытие существования в средней атмосфере (мезосфере) собственных мощных электрических полей (с напряженностями поля Е до 1-10 В/м) привело к необходимости пересмотра и уточнения моделей электродинамических процессов в глобальной атмосферной электрической цепи [1-3]. Однако, явный недостаток экспериментальных данных об основных характеристиках мощных мезосферных электрических полей (ММЭП) делает проблематичным успешное решение вышеуказанного класса задач. В частности, какие-либо сведения о суточных изменениях напряженности ММЭП до последнего времени вообще отсутствовали. Поэтому в данной работе излагаются результаты исследования временных изменений напряженности ММЭП, полученные с помощью разработанного в ХНУ имени В. Н. Каразина метода дистанционной диагностики параметров электрически активной мезосферы по регистрациям частично отраженных от нижней ионосферы СЧ и ВЧ радиосигналов (см., напр., [2]).

Известно, что усредненные по ансамблю реализаций региональные суточные временные зависимости напряженности приземного электрического поля характеризуются так называемыми кривыми Карнеги. Эти кривые получаются на основе многолетних измерений параметров тропосферной составляющей глобальной атмосферной электрической цепи [3].

### Основные результаты

Получение подобных характеристик электрически активной мезосферы проводилось с привлечением многолетних (1978 – 2010 гг.) регистраций сигналов на радиотехническом комплексе частичных отражений в радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина (пос. Гайдары Харьковской обл.). При этом использовались сигналы со следующими параметрами: рабочие частоты – 1,8 – 3,0 МГц, длительность зондирующих импульсов – 25 мкс, частота повторения импульсов – 1 Гц, преобладающий высотный диапазон частично отраженных (ЧО) сигналов – 60 – 66 км. Анализировались также результаты экспериментальных регистраций ЧО сигналов, полученные на СЧ радаре Institute of Space and Atmospheric Studies (ISAS), University of Saskatchewan, Canada (беспрерывные измерения за 1979 – 1981 гг. с высот 61 – 67 км, длительность зондирующих импульсов 20 мкс, рабочая частота 2.2 МГц).

Разработанный на кафедре космической радиофизики ХНУ имени В. Н. Каразина метод дистанционной диагностики характеристик ММЭП, а также параметров ионосферы возмушенной плазмы нижней основан на полученной нами детерминированной связи напряженности этих полей с величиной возмущенной эффективной частоты соударений электронов в области D ионосферы (см., например, [2]). Сама же эффективная частота соударений дистанционно измеряется при помощи регистрации частично отраженных в области D радиосигналов. Суммарная минимальная ошибка предложенного метода составляет около 20%, конкретные ж значения ошибок уточнялись в каждом конкретном эксперименте.

Для примера на рис. 1 приведена временная зависимость напряженности ММЭП, полученная с использованием дневных регистраций частично отраженных сигналов в районе г. Харькова за 29 ноября 1984 года.

Соответствующий пример временной зависимости ММЭП, полученной по регистрациям частично отраженных сигналов в ISAS, Saskatoon, Canada 27 марта 1979 года, дан на рис. 2.

Видно, что даже на достаточно коротких временных интервалах напряженность ММЭП непостоянна, что приводит к соответствующей изменчивости основных электродинамических параметров мезосферы.





университета имени В. Н. Каразина



Рис. 2. Временная зависимость напряженности ММЭП, полученная в ISAS, Saskatoon.



Рис. 3. Суточная зависимость напряженности мощных мезосферных электрических полей, полученная в радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Кривая Карнеги получена в Германии

На рис. 3 приведено усредненное суточное распределение изменений напряженности ММЭП в зависимости от мирового времени (UT) для Харьковского региона (265 сеансов измерений, средняя продолжительность сеанса 10 минут). Видно наличие двух максимумов средней напряженности ММЭП. Подобное возрастание наблюдается в среднем и для приземного электрического поля (кривая Карнеги, полученная в Германии). Кривые Карнеги с двумя максимумами соответствуют континентальным

летним геофизическим условиям, а также условиям над промышленными регионами [3 – 5].

На рис. 4 приведено усредненное суточное распределение изменений напряженности ММЭП в зависимости от мирового времени для региона центральной Канады (Institute of Space and Atmospheric Studies (ISAS), University of Saskatchewan, Canada, 170 сеансов измерений, средняя продолжительность сеанса 15 минут) и кривая Карнеги для промышленного региона Германии. Здесь также можно видеть наличие двух максимумов.



Рис. 4. Суточная зависимость изменений напряженности ММЭП от мирового времени (UT), Канада. Кривая Карнеги получена в Германии

#### Заключение

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований были впервые получены суточные временные распределения напряженности ММЭП для различных регионов земного шара, что является необходимым шагом в разработке адекватных электродинамических моделей средней атмосферы. Показано, что эти зависимости имеют два максимума. Сравнение полученных результатов с кривыми Карнеги для приземных электрических полей выявило общие черты во временном поведении мезосферных и приземных электрических полей, что свидетельствует о наличии общих факторов влияния на эти составляющие глобальной атмосферной электрической цепи, включая и возможное влияние промышленной деятельности человека.

## Литература

- Manson A. H., Meek C. E., Martynenko S. I., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., VLF Phase Perturbations Produced by the Variability in Large (V/m) Mesospheric Electric Fields in the 60–70 km Altitude Range. *Characterising the Ionosphere. Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056*. Neuilly-sur Seine, France: RTO. Available from: <u>http://www.rto.nato.int/abstracts.asp</u>, 2006, pp. 8-1–8-24.
- 3. Rycroft M. J. Electrical processes coupling the atmosphere and ionosphere: An overview. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2006, Vol. 68, pp. 445–456.
- 4. Volland H. Atmospheric electrodynamics. Berlin, Springer-Verlag, 1984. 205 p.
- 5. Bering E. A., Few A. A., Benbrook J. R. The global electric circuit. *Phys. Today*, 1998, Oct., pp. 24–30.

<sup>1.</sup> Martynenko S. I., Clifford S. F. On the electrical coupling between the troposphere and the mesosphere. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 2007, Vol. 6, pp. 1–6.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В РАДИОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

## И. Г. Захаров

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы, 4, тел.: (380)7071051, e-mail: giz-zig@ukr.net

Введение. Сейсмические явления, особенно на заключительной стадии подготовки землетрясения (3T), сопровождаются световыми явлениями, возмущениями атмосферного электрического потенциала и электротеллурического поля, а также аномалиями импульсного электромагнитного излучения (ИЭМИ) в широком диапазоне частот [см., например, 1-4]. Измерения ЕЭМИ проводились на расстояниях десятки – сотни километров от гипоцентра землетрясения, т.е. в пределах области, которую определяют как область проявления предвестников землетрясения [5]. Ее радиус составляет

$$R(\kappa M) = e^M , \qquad (1)$$

где *М* – магнитуда землетрясения, что примерно в 30 раз больше, чем размер самого очага землетрясения, определяемого по наличию поверхностных деформаций. При этом, аномальное увеличение ИЭМИ начинается тем раньше, чем больше магнитуда предстоящего землетрясения:

$$\Delta T \ [\text{годы}] = 10^{0.26M - 3.50} \,. \tag{2}$$

Аномалии ИЭМИ, связанные с сейсмической активностью, обычно проявляются за несколько недель – несколько часов до события, как правило, в виде увеличения интенсивности регистрируемого сигнала в 1,5 – 4 раза в широком диапазоне частот ~ 5 – 150 кГц, в том числе за пределами максимальной амплитуды атмосфериков 7 – 12 кГц [3]. Спектр ИЭМИ достаточно устойчивый [6], но накануне землетрясения возможны искажения типичного суточного хода ИЭМИ.

В целом, измерения ИЭМИ являются эпизодическими, несмотря на то, что электромагнитной могут аномалии природы быть достаточно надежными предвестниками землетрясений. Сравнение регистраций ИЭМИ проводится, как правило, с наиболее сильными ЗТ в данном регионе (в пределах указанной выше зоны). Исходя из сказанного, и опираясь на предварительные результаты, полученные на ограниченном объеме данных [7,8], представляет интерес сравнение вариаций интенсивности ИЭМИ с изменениями как региональной, так и глобальной сейсмической активностей, оцениваемых по числу землетрясений. При выполнении исследований в сейсмически спокойном регионе достаточно проводить сравнение с глобальной сейсмической активностью. Цель работы – изучить возможность появления сигналов ИЭМИ вдали от очагов сейсмической активности.

Аппаратура и методы. Регистрация магнитной компоненты ИЭМИ проводилась в ОНЧ диапазоне (2,5 – 50 кГц) приемником с трехкоординатной антенной (ось X – север-юг, Y – запад-восток, Z – в зенит), измеряющим числа импульсов за 1 мин с амплитудой выше заданного порога дискриминации. Измерения проводились в Харьковской обл., Украина, с 28 апреля 2007 года по 10 мая 2008 года. Место измерения характеризуется отсутствием сильных искусственных источников электромагнитных помех. Проведено сопоставление полученных данных с глобальной сейсмической активностью. Данные о землетрясениях взяты из электронных каталогов USGS (http://neic.usgs.gov/neic/epic/) и (http://www.sec.noaa.gov).

**Результаты.** Интенсивность ИЭМИ существенно изменяется во времени, наиболее очевидными являются суточные вариации. Форма суточных вариаций ИЭМИ подвержена сезонным изменениям с максимумом в неосвещенное время суток в осенне-зимний период, ночным и послеполуденным максимумами в весенне-летний период.

В течение большинства дней суточные вариации ИЭМИ были однотипными с сохранением соотношения интенсивностей излучения между компонентами Х, Ү и Z. Типичный спектр ИЭМИ (пример на рис. 1 а) имеет выраженную суточную (1440 мин) и полусуточную (720 мин) компоненты; также можно выделить периоды 1,5 суток (2160 мин), 3 суток (4320 мин.) и ~7 суток (10080 мин).

В отдельные дни суточные вариации ИЭМИ имели заметные и даже значительные особенности, наиболее явные из которых – изрезанность суточного хода, резкое изменение соотношения амплитуд локальных максимумов. Спектры ИЭМИ для таких периодов (на рис. 2 б представлен пример аномального спектра 8-11.04.08) характеризуются исчезновением суточной компоненты при сохранении полусуточной и появлением новых максимумов. Указанные изменения обычно наблюдаются в течение нескольких суток подряд, часто в дни, предшествующие 3Т. Для приведенного примера мощные сейсмические события (M > 7) имели место 12.04.08).



Рис. 1. Спектр ИЭМИ по каналу Х: а – типичный; б – аномальный.

Значительные изменения амплитуды суточных вариаций обусловливают наличие долговременных изменений интенсивности ИЭМИ. Было проведено сопоставление этих вариаций с изменениями уровня глобальной сейсмической активности (ГСА).

За период наблюдений, распределение по магнитудам числа ЗТ заметно отличалось от теоретического, определяемого известным соотношением  $lg_{10} N = a - bM$  [5] и характеризовалось наличием относительного минимума числа ЗТ с магнитудой около 5, что позволяет допустить, что более слабые ЗТ отражают фоновую сейсмическую активность, а более сильные – ее кратковременные усиления. Поэтому в качестве индикатора ГСА было выбрано число ЗТ с магнитудой более 5. Как было показано ранее [9], данная неравномерность, с высокой вероятностью, вызвана иерархией блокового строения земной коры, вследствие которой определенные размеры блоков встречаются заметно чаще. Как следствие, размеры области подготовки землетрясения (V) и, соответственно, их магнитуды ( $M \sim V$ ) также должны быть неравномерны (должны иметь ранги).

На рис. 2 приведены изменения ото дня ко дню среднесуточных значений ИЭМИ (исходные и усредненные по 3 суткам) и число 3T с M>5,0, также с усреднением по 3 суткам. Видно, что в изменении рассматриваемых характеристик имеется определенное сходство, однако, для более надежных выводов необходим дополнительный анализ.


Рис. 2. Сопоставление интенсивности ИЭМИ и числа 3T с M>5.0 за период наблюдения

Для более детального анализа отобраны 6 периодов с наиболее выраженным увеличением числа сильных 3T после относительного затишья, при этом продолжительность затишья была не менее ожидаемого периода проявления предвестников, определяемого соотношением (2). На рис. 3 приведены наиболее характерные изменения ИЭМИ накануне серии сильных ЗТ, наиболее мощное из которых имело магнитуду М = 6,8, при этом до этих событий в течение достаточно длительного времени уровень ГСА сохранялся стабильно низким. Вертикальной чертой показано расчетное время появления предвестника в соответствии с (2). Видно, что примерно за 7 суток до 3Т происходит увеличение интенсивности ИЭМИ на всех каналах. Сопоставление фактического и ожидаемого времени проявления предвестника для всех рассмотренных 6 интервалов времени показало удовлетворительное согласие между ними. Наличие аномалий ИЭМИ после усиления ГСА также достаточно очевидны.



Рис. 3. Типичное изменение ИЭМИ по 3 каналам накануне и после усиления ГСА

Во многих случаях проявляются также квазигармонические флуктуации амплитуды принимаемого сигнала. В частности, после ЗТ в Индонезии 26 декабря 2004 г. (вблизи о. Суматра) волновые колебания амплитуды принимаемого сигнала началось примерно в 14:15 UT, т.е. примерно через 13,25 часа после главного толчка [8]. Кажущаяся скорость распространения возмущения составила порядка 600 м/с, период волны постепенно увеличивался примерно с 10 до 20 мин (частоты  $f \sim 0,002 - 0,0008$  Гц), что соответствует внутренним гравитационным волнам.

В целом, наши результаты согласуются с полученными другими авторами. В то же время, принципиальным отличием является то, что в нашем случае измерения проводились в сейсмически спокойном регионе далеко за пределами зоны проявления

предвестников (1), принятой в настоящее время. Еще одно различие касается проявления эффекта на разных каналах; обычно наиболее сильный эффект регистрируют по соотношению вертикальной и горизонтальной компонент поля Z/H, тогда как в нашем случае изменения всех компонент поля чаще всего были однотипны. Первый случай в наших данных также регистрируется, но значительно реже.

Обсуждение. Попытки объяснить вариации ИЭМИ выходом излучения килогерцового диапазона из сейсмического очага на дневную поверхность встречается как известно, толщина скин-слоя на этих частотах с серьезными трудностями: составляет около сотни метров. Поэтому одним из основных механизмов формирования электромагнитных предвестников рассматривают изменение проводимости приземной атмосферы за счет природных газов, выходящих по микротрещинам на поверхность в зоне готовящегося 3T [4]. Именно этот механизм позволяет, в частности, объяснить изменение соотношения горизонтальной и вертикальной компонент поля.

В нашем случае имеет место по крайней мере две принципиальные особенности: 1) электромагнитный эффект проявляется далеко за пределами очага ЗТ (скорее всего, эффект является планетарным); 2) изменения ИЭМИ, как правило, однотипны для всех компонент поля.

Из возможных механизмов наибольшее внимание заслуживает механизм, предложенный для объяснения постоянно существующей, но изменяющейся во времени спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы (СЭМЭЗ) (см., например, [1, 10]). Получены в общем виде нелинейные уравнения для описания процессов генерации и распространения излучения. Предварительно показана возможность аномально дальнего распространения возмущения.

СЭМЭЗ представляет собой электромагнитную составляющую акустосейсмоэлектромагнитного шума литосферы, который имеет диффузную природу и образуется при просачивании глубинных флюидов через твердотельную компоненту земных недр. Подобные нелинейные процессы происходят в открытой (активной) неравновесной среде, которой и является литосфера. Фронт концентрации флюида формирует всплеск комплексной диэлектрической проницаемости, рассеивание которого ведет к генерации электромагнитных и других возмущений. СЭМЭЗ регистрируется повсеместно, но более мощное излучение приурочено к напряженнодеформированным участкам земной коры. На основе регистрации этой эмиссии к настоящему времени разработан и реализован новый геофизический метол исследования земных недр [11].

Распространение связанных акустоэлектромагнитных состояний, возникающих в активных диссипативных системах с диффузией, описывается системой уравнений типа "реакция – диффузия", в которой уравнения Максвелла – только их составляющая. Как следствие, становится возможным сверхдальнее распространение возмущения (по сравнению с распространением плоской монохроматической волны в среде). Излучение имеет и другие необычные свойства, в частности, распространяется в конусе независимо от геоэлектрических характеристик разреза [11]. В работе [11] впервые также освещено отличие СЭМЭЗ от обычно рассматриваемого на основе классических представлений естественного импульсного электромагнитного излучения.

Исходя из изложенного, можно допустить, что возмущение от сейсмического очага распространяется в земной толще в виде акустико-электромагнитных возмущений. При прохождении через земную толщу возмущения воздействуют на дислокации кристаллической решетки горных пород, находящиеся в неустойчивом состоянии, что приводит к усилению постоянно существующей спонтанной литосферной эмиссии.

**Выводы.** Вариации ИЭМИ в сейсмически спокойном регионе в течение суток и ото дня ко дню имеют особенности, которые коррелируют с изменениями глобальной сейсмической активности. Эффекты в вариациях ИЭМИ проявляются как до усиления

сейсмической активности с заблаговременностью, пропорциональной магнитуде ЗТ, так и в первые сутки после ЗТ.

В целом, преобладают однотипные изменения ОНЧ по всем каналам, тогда как изменения отношения горизонтальной и вертикальной компонент поля, широко рассматриваемых в литературе, проявляются реже.

Наличие электромагнитного эффекта сейсмической активности далеко за пределами обычно рассматриваемой зоны проявления предвестников и наличие особенностей в соотношении вариаций отдельных компонент указывает на существование механизма, не связанного с выходом на поверхность инертных газов в зоне готовящегося ЗТ. Возможным механизмом усиления ИЭМИ в сейсмически спокойном регионе может быть усиление постоянно существующей спонтанной литосферной эмиссии под воздействием возмущений, распространяющихся в земной коре из сейсмического очага.

## Литература

- 1. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. М.: Моск. инж.-физ. ин-т, 2000. 235 с.
- 2. Гульельми А.В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 12. – С. 1257-1276.
- 3. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М.А. Садовского. М.: Наука, 1982. 88 с.
- Hayakawa Hayakawa M., Molchanov O.A., Nickolaenko A.P. Model Variations in Atmospheric Radio Noise Caused by Pre-Seismic modification of Tropospheric Conductivity Profile // Seismo Electromagnetics. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Ed. by M. Hayakawa and O.A. Molchanov. – Tokyo, TERRAPUB, 2002. – P. 349–352.
- 5. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: Наука, 1991. 224 с.
- 6. Электрические и магнитные предвестники землетрясений. Ташкент: ФАН, 1983. 136 с.
- Bogdanov Yu.A., Zakharov I.G., Tyrnov O.F., Hayakawa M. Electromagnetic effects Associated with Regional Seismic Activity in Crimea during the Interval July-August 2002 // J. Atmospheric Electricity. – 2003. Vol. 23, No. 2. – P. 57-67.
- 8. Bogdanov, Yu. A., Zakharov I. G. Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity // Proceeding of the 6<sup>th</sup> Int. Conference "Problem of Geocosmos". St. Petersburg, Petrodvorets, May 23-27, 2006. P. 357-360.
- 9. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 101 с.
- 10.Шуман В.Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофизический журнал. 2007. Т. 29, № 2. С. 3-16.
- 11. Шуман В.Н., Коболев В.П., Старостенко В.И, Буркинский И.Б., Лойко Н.П., Захаров И.Г., Яцюта Д.А. Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, полевой эксперимент, элементы теории // Геофизический журнал. 2012. Т. 34, № 4. С. 40–61.

# ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД

#### Д.О. Батраков, Д.В. Головин, О.Д. Батраков

Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина, Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы, 4, E-mail: Dmitry.O.Batrakov@univer.kharkov.ua

Интерпретация данных дистанционного зондирования природных сред и технических объектов приводит к необходимости разработки методов решения так называемых обратных задач. Эти задачи принято называть обратными, поскольку они сводятся к отысканию неизвестных коэффициентов уравнений по известным решениям (регистрируемым данным), как правило, – полям в дальней зоне. Такая ситуация характерна и для исследований ионосферы.

К решению таких задач существуют различные подходы, предполагающие решение диференциальных или интегральных уравнений, либо использование методов теории параметрической оптимизации. Каждый подход имеет свои преимущества и недостатки и на данный момент универсального метода решения таких задач даже в относительно простом случае плоскослоистых стред не существует. Основные трудности, возникающие при решении, связаны с неполнотой наборов данных и некоррктностью задачи. Иными словами такие задачи имеют не единственное решение и это решение неустойчиво, т.е. малые возмущения в исходных данных приводят к значительным изменениям в решении. Поскольку при реальных экспериментах всегда существуют погрешности измерений, из неустойчивости решения вытекает возможность его значительного отклонения от истинного. Поэтому одновременно с процедурой отыскания решения необходимо решить задачу выбора из нескольких вариантов одного, наиболее близкого к действительному распределению неизвестного параметра (либо параметров). Эту задачу можно включить в алгоритм решения различными способами. В настоящей работе рассмотрим два часто используемых подхода – сведении к интегральным уравнениям и прямые методы, основанные на генетических алгоритмах.

Одним из подходов к решению задач дистанционного зондирования является метод, основанный на сведении задачи восстановления профиля диэлектрической проницаемости к задаче минимизации функционала невязки [1]. Для решения задачи минимизации функционала невязки используют как точные методы, так и пользующиеся большей популярностью итеративные методы. В основе итеративных подходов лежит метод Ньютона-Канторовича. При этом, для устранения некорректности поставленной обратной задачи рассеяния, обычно применяется регуляризация Тихонова [1].

Рассмотрим постановку задачи и метод решения в самом общем виде.

Поле, создаваемое сторонними источниками в пробной структуре, может быть записано как:

$$\vec{E}(\vec{R}) \equiv \vec{E}_{aux}(\vec{R}) + \frac{ik_0 c}{4\pi} \int_V dV' \left[ \hat{G}_{ee}(\vec{R}, \vec{R}') \hat{\eta}(\vec{R}') \vec{E}(\vec{R}') \right]$$
(1)

где  $\hat{G}_{ee}(\vec{R},\vec{R}')$  - полевая функция Грина пробной структуры,  $\hat{\eta} = \varepsilon'_{aux} - \varepsilon'$  - искомая поправка к профилю диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{aux}(z)$  пробной структуры. Если  $\hat{\eta}(R)$  - малая величина, т.е. диэлектрические проницаемости эталонного и исследуемого тела различаются незначительно, мы получаем борновское приближение, отбрасывая члены  $\cong \eta^2$ 

$$\vec{E}(\vec{R}) \approx \vec{E}_{S}(\vec{R}) + \frac{ik_{0}c}{4\pi} \int_{V_{P}} dV' \Big[ \hat{G}_{ee}(\vec{R}, \vec{R}') \hat{\eta}(\vec{R}') \vec{E}_{S}(\vec{R}') \Big]$$
(2)

Пусть теперь  $\vec{R}_H$  - радиус-вектор точки наблюдения вне исследуемого тела,  $\vec{p}(\vec{R})$  - вектор, определяющий поляризацию, на которой регистрируется поле в точке наблюдения. Тогда:

$$\vec{U}(\vec{R}_{H}) = U_{in}(\vec{R}_{H}) + \frac{ik_{0}c}{4\pi} \int dV' \Big[ \vec{p}(\vec{R}_{H}) \hat{G}_{ee}(\vec{R},\vec{R}') \hat{\eta}(\vec{R}') \vec{E}_{in}(\vec{R}') \Big]$$
(3)

Если диэлектрические проницаемости исследуемого и эталонного тела - скалярные величины, приходим к соотношению:

$$U(\vec{R}_{H}) = U_{in}(\vec{R}_{H}) + (L\eta)(\vec{R}_{H}) \equiv U_{in}(\vec{R}_{H}) + \int dV' L(\vec{R}_{H}, \vec{R}') \eta(\vec{R}')$$
(4)  
V<sub>P</sub>  
Где:  $\eta(\vec{R}) = \varepsilon_{P}(\vec{R}) - \varepsilon(\vec{R}), \ L(R_{H}, R') = p(R_{H})G_{ee}(R_{H}, R')E_{in}(R')\left[\frac{ik_{0}c}{4\pi}\right].$ 

**Процедура регуляции и восстановления профиля.** Пусть для каждого из N значений параметра λ известны соответствующие значения:

$$U^{(1)}(\vec{R}_H), U^{(j)}_{in}(\vec{R}_H), L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}'), j = 1, 2...N.$$

В качестве λ могут выступать частота, радиус-вектор точки наблюдения, величины, характеризующие поляризацию или направление распространения волны, испускаемой, сторонними источниками и т.д. Согласно (4) получаем:

$$U^{(j)}(\vec{R}_{H}) = U^{(j)}_{in}(\vec{R}_{H}) + \int_{V_{P}} L^{(j)}(\vec{R}_{H}, \vec{R}') \eta(\vec{R}') dV'; j = 1, 2...N.$$
(5)

Это система N интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода относительно  $\eta(\vec{R}), (R \in V_P)$ . Ищем  $\eta(\vec{R})$  как функцию, реализующую минимум сглаживающего функционала [1]

$$F[\eta] = \sum_{j=1}^{N} w_j \left| U^{(j)}(\vec{R}_H) - U^{(j)}_{in}(\vec{R}_H) - \int_{V_P} L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}') \eta(\vec{R}') dV' \right|^2 + \alpha \int_{V_P} w(\vec{R}) \left| \eta(\vec{R}) \right|^2 dV.$$
(6)

Здесь  $w_j$  - весовые коэффициенты,  $w(\vec{R})$  - весовая функция,  $\alpha$  - параметр регуляризации (все - положительно определенные величины).

Условием экстремума функционала, как известно, является требование обращения в нуль его первой вариации  $\delta F$ . Соответствующее уравнение называют уравнением Эйлера. В данном случае оно имеет вид:

$$\sum_{j=1}^{N} w_{j} L^{(j)*}(\vec{R}_{H},\vec{R})[U_{in}^{(j)}(\vec{R}_{H}) - U^{(j)}(\vec{R}_{H})] + \int_{V_{P}} dV' \left[ \sum_{j=1}^{N} w_{j} L^{(j)*}(\vec{R}_{H},\vec{R}) L^{(j)}(\vec{R}_{H},\vec{R}') \right] \eta(\vec{R}') + \alpha w(\vec{R}) \eta(\vec{R}) = 0; \quad (\vec{R} \in V_{P}).$$
<sup>(7)</sup>

Перепишем уравнение Эйлера в форме:

$$-\int_{P} K(\vec{R}, \vec{R}') \eta(R) dV' + \alpha w(\vec{R}) \eta(\vec{R}) = q(\vec{R}), (\vec{R} \in V_P)$$

$$V_P$$
(8)

Это - интегральное уравнение Фредгольма II рода с вырожденным ядром:

$$K(\vec{R}, \vec{R}') = \sum_{j=1}^{N} w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}')$$

и правой частью:

$$q(\vec{R}) = \sum_{j=1}^{N} w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') [U_{iH}^{(j)}(\vec{R}) - U^{(j)}(\vec{R}_H)]$$

Из уравнения Эйлера с учетом вырожденности его ядра следует, что его решение может быть представлено как:

$$\eta(\vec{R}) = \frac{1}{\alpha w(\vec{R})} [q(\vec{R}) + \sum_{j=1}^{N} w_j L^{(j)*}(\vec{R}_H, \vec{R}') x_j], \tag{9}$$

где

$$x_j = const = \int dV' L^{(j)}(\vec{R}_H, \vec{R}) \eta(\vec{R}'), \quad j = 1, 2...N$$
  
 $V_P$ 

Подставив под интеграл выражения для  $\eta(\vec{R}')$ , приходим к системе N линейных алгебраических уравнений относительно  $\{x_i\}$ 

$$\begin{aligned} x_{j} + \sum_{n=1}^{N} a_{jn} x_{n} &= \psi_{j}; (j = 1, 2...N); \quad a_{jn} = w_{n} \int_{V_{P}} L^{(j)}(\vec{R}_{H}, \vec{R}') L^{(n)*}(\vec{R}_{H}, \vec{R}') \frac{dV}{\alpha w(\vec{R}')}; \\ \psi_{j} &= \int_{V_{P}} L^{(j)}(\vec{R}_{H}, \vec{R}') \frac{q(\vec{R}')}{\alpha w(\vec{R}')} dV' \end{aligned}$$
(10)

Решая (10) относительно  $\{x_j\}$  мы можем по прямой формуле (9) определить  $\eta(\vec{R})$  и найти искомый профиль из соотношения:

$$\varepsilon(\vec{R}) = \varepsilon_{S}(\vec{R}) - \eta(\vec{R}) \tag{11}$$

Далее для уточнения  $\varepsilon(\vec{R})$  можно опять повторить процедуру восстановления, подставив  $\varepsilon(\vec{R})$  из (12) в (5) вместо  $\varepsilon_P(\vec{R})$  и так до достижения требуемой точности.

Суть **генетических алгоритмов** [2] состоит в имитации механизма естественной селекции и эволюции. Эти алгоритмы предназначены для решения оптимизационных задач. Стандартный генетический алгоритм (СГА) переводит оптимизационные параметры в строку двоичных кодов. Таким образом, гены в СГА являются фактически двоичными кодами. Хромосомы (Chr) в этом случае представляют собой «сцепку» генов, имеющую форму:

$$Chr = \overbrace{g_1^1 \ g_2^1 \cdots g_{L_1}^1}^{x_1} \quad \overbrace{g_1^2 \ g_2^2 \cdots g_{L_2}^2}^{x_2} \cdots \overbrace{g_1^N \ g_2^N \cdots g_{L_N}^N}^{x_N};$$
(12)

где  $g_j^i$  – ген, а L<sub>i</sub> - длина кодовой строки для j-го оптимизационного параметра. Соответствие между хромосомами и оптимизационными параметрами дается следующей формулой:

$$x_{i} = x_{i}^{\min} + \frac{x_{i}^{\max} - x_{i}^{\min}}{2^{L_{i}} - 1} \sum_{j=1}^{L_{i}} g_{j}^{i} 2^{L_{i} - j}; \quad i = 1, N,$$
(13)

где интервал  $\begin{bmatrix} x_i^{\min}, x_i^{\max} \end{bmatrix}$  является областью поиска для i-го оптимизационного параметра.

### Литература

- 1. Батраков Д.О. Качество и эффективность обработки информации при радиоволновом контроле слоистонеоднородных диэлектриков многочастотным методом.// Дефектоскопия N8. С.68-76, 1998.
- 2. Z. Q. Meng, T. Takenaka, and T. Tanaka, "Image reconstruction of two-dimensional impenetrable objects using genetic algorithm," /J. Electromagn. Waves Applicat., vol. 13, pp. 95-118, Jan. 1999.

# ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИЗЕМНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНОЙ МЕЗОСФЕРЕ

## С.И. Мартыненко, В.Т. Розуменко, О.Ф. Тырнов

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина Украина, Харьков, 61022, пл. Свободы 4, e-mail: Sergey.I.Martynenko@univer.kharkov.ua

Введение. Включение электрически активной мезосферы в состав глобальной атмосферной электрической цепи открывает новые возможности при моделировании сложных электродинамических тропосферно-мезосферно-ионосферных связей. Впервые собственные мощные электрические поля в мезосфере с напряженностями Е до 1–10 В/м были обнаружены с помощью прямых ракетных измерений в 70-х годах прошлого столетия в различных регионах Земли различными группами исследователей [1 – 4]. Дальнейшее экспериментальное изучение электродинамики средней атмосферы позволило подтвердить и обобщить полученные ранее результаты, а вопрос о реальности существования собственных мощных мезосферных электрических полей был решен положительно и снят с повестки дня [5, 6]. При этом стало ясно, что мошные мезосферные электрические поля не только играют важную роль в электродинамике нижней ионосферы, но также могут создавать дополнительные электрические связи между различными областями атмосферы в рамках общей глобальной атмосферной электрической цепи [7 – 9]. Особенно это касается тропосферно-мезосферных связей при наличии больших возмущений приземной проводимости. Развитие радиофизических методов дистанционного контроля состояния окружающей среды, особенно в возмущенных условиях, обуславливает актуальность моделирования влияния процессов в электрически активной мезосфере на условия распространения радиоволн различных диапазонов.

Целью данной работы является обсуждение возможного механизма влияния возмущений приземной проводимости на характеристики плазмы в электрически активной мезосфере.

Результаты экспериментов. Впервые целенаправленные эксперименты по изучению особенностей распространения ОНЧ радиосигналов в волноводе Земляионосфера над районами больших возмущений приземной проводимости (районы АЭС при авариях с выбросами в атмосферу радиоактивных веществ, а также сейсмоактивные регионы) в предположении наличия мощных мезосферных электрических полей (ММЭП) проводились в Радиоастрономическом институте НАН Украины [9 – 12]. Аномалии фазы сигналов на частотах 10,2 и 13,6 кГц наблюдались на трассе, проходящей вблизи Ленинградской АЭС (Алдра, Норвегия, 66°25' N, 13°09' Е – Харьков, Украина, 50° N, 35° E) во время аварийного выброса радиоактивных веществ (повышение радиационного фона в 2-3 раза) 25 и 26 марта 1992 г. В эти дни регистрировалось существенное понижение среднего дневного уровня фазы по сравнению с предыдущими и последующими днями в спокойных гелиогеофизических условиях. Результаты статистической обработки массива данных с 9 марта 1992 г. по 7 апреля 1992 г. показали, что при среднеквадратичном отклонении дневной фазы на частоте 10.2 кГц до ~1.5 сц дневной уровень 25 марта 1992 г. снизился на 5.6 сц. а 26 марта 1992 г. — на 4,6 сц. На частоте 13,6 кГц при среднеквадратичном отклонении до ~1,2 сц дневной уровень 25 марта 1992 г. был ниже на 4 сц, а 26 марта 1992 г. — на 2,4 сц. Если предположить, что модовый состав сигнала сохраняется неизменным, то понижение среднего дневного уровня фазы будет свидетельствовать об уменьшении эквивалентной высоты волновода на ограниченном участке трассы, так как в волноводе

Земля-ионосфера уменьшение высоты верхней границы приводит к увеличению фазовой скорости волны и уменьшению фазовой составляющей сигнала при одномодовом распространении. Оценки показали, что при изменении высоты верхней границы волновода на 5–10 км характерные размеры неоднородной области вдоль трассы должны составлять ~600–300 км. Естественно было предположить, что эти высотные изменения вызываются соответствующими возмущениями параметров ионосферной плазмы на мезосферных высотах.

Аномальное поведение амплитуды и фазы сигнала с частотой 16 кГц за счет изменения параметров нижней границы ионосферы наблюдалось на трассе, проходящей непосредственно над районом радиационного загрязнения во время аварии на Чернобыльской АЭС (трасса Рагби, Великобритания, 52°22' N, 01°11' W – Харьков, Украина, 50° N, 35° E). При этом скорость ионообразования вблизи поверхности Земли возрастала на несколько порядков величины [13], что приводило к соответствующему возрастанию тропосферной проводимости. Подобные возмущения приземной проводимости наблюдаются также в сейсмоактивных регионах в период подготовки и во время сильных землетрясений.

Моделирование тропосферно-мезосферного взаимодействия. Для объяснения быстрого тропосферно-мезосферно-ионосферного механизма взаимодействия в возмущенных условиях при наличии ММЭП была предложена следующая упрощенная схема [7, 14]. Основными составляющими этой электрической схемы являлись: источник мезосферного тока с плотностью  $i_m \sim 10^{-8} - 10^{-9}$  А/м<sup>2</sup>, который вызывает, в первую очередь, возмущения температуры и эффективной частоты соударений электронов по сравнению с общепринятыми фоновыми значениями; приземное (тропосферно-стратосферное) сопротивление  $R_t$ ; мезосферное сопротивление нагрузки R<sub>m</sub> для мезосферного источника; внешнее сопротивление глобального слоя атмосферы между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы  $R_a \approx 200$  Ом. В невозмущенных атмосферных условиях плотность тока "ясной" погоды  $j_a \sim 10^{-12}$  А/м<sup>2</sup> и  $j_m >> j_a$ , поэтому при наличии  $j_m$  величиной  $j_a$  можно пренебрегать. В невозмущенных условиях  $R_t >> R_m >> R_a$ , а полное сопротивление нагрузки мезосферного источника будет  $R_i = R_m R_t / (R_m + R_t) \approx R_m$ , т. е. электрические тропосферно-мезосферные связи практически не проявляются, значения же температуры и эффективной частоты соударений электронов поддерживаются за счет мощных мезосферных электрических полей на повышенном уровне.

При возникновении больших возмущений тропосферной проводимости соотношение между величинами  $R_t$  и  $R_m$  изменяется, что отражается и на величине  $R_i$ . Например, при уменьшении  $R_t$  до двух порядков  $R_t \ll R_m$ , а  $R_i \approx R_t$ . Тогда разность потенциалов U в мезосфере, определяющая напряженность ММЭП Е, становится зависимой от  $R_t$ . Уменьшение  $R_i$  и  $R_t$  приводит к соответствующему уменьшению E и, как следствие, к уменьшению температуры электронов *T<sub>e</sub>* в мезосфере при увеличении проводимости тропосферы. Таким образом, "короткое замыкание" мезосферного источника электричества на значительно уменьшившееся тропосферное сопротивление приводит к "охлаждению" электронов в области D ионосферы. что в предельном случае способствует переходу этой области ионосферы из неизотермического состояния в изотермический (то есть средние температуры электронов, ионов и нейтральных частиц становятся равными). В целом же наличие ММЭП приводит к формированию дополнительных электродинамических тропосферно-мезосферных связей возмущенных условиях.

**Результаты численного моделирования.** Для расчета влияния уменьшения напряженности мощных мезосферных электрических полей на параметры нижней ионосферы использовалась система уравнений баланса для температуры электронов  $T_e$ , концентрации электронов N и концентрации положительных ионов  $N^+$  в слоистонеоднородной слабоионизованной плазме, дополненная условием квазинейтральности

и материальным уравнением для ММЭП [8, 9]. Первичные значения  $T_e$  в мезосфере при отсутствии наличии ММЭП И тропосферных возмущений проводимости использованием решения вышеуказанной системы рассчитывались с в квазистационарном случае (E = 1 - 10 В/м, высоты z = 60 - 75 км в дневных условиях). Результаты численного моделирования для сильно возмущенных тропосферных условий (т. е.  $R_t \ll R_m$ ) показали, что, например, вблизи высоты z = 60 км при понижении напряженности ММЭП на  $\Delta E_1 = 1$  В/м и  $\Delta E_2 = 10$  В/м величины  $T_e$ понижаются в 2,3 и 12 раз соответственно. Это вызывает уменьшение эффективной частоты столкновений электронов ve в 2 и 8 раз, а также увеличение концентрац электронов N в 1,1 раза ( $\Delta E_1 = 1$  В/м) и уменьшение N в 2 раза ( $\Delta E_2 = 10$  В/м). В итоге увеличивается электронная проводимость мезосферной плазмы, что приводит к понижению высот фиксированных уровней ионосферной проводимости для ОНЧ сигналов приблизительно на  $\Delta z_1 \le 5$  км и  $\Delta z_2 \le 10$  км соответственно. Численные расчеты показывают, что определяющую роль здесь играет результирующее уменьшение эффективной частоты соударений электронов ve. Подобный эффект "понижения" нижней границы ионосферы и был зарегистрирован в описанных выше экспериментах с использованием измерений характеристик ОНЧ сигналов. распространяющихся над районами АЭС во время аварий с выбросами в атмосферу радиоактивных веществ [9-12].

Выводы. Таким образом, при наличии собственных мощных мезосферных электрических полей появление значительных возмущений тропосферной проводимости (например, над районами АЭС во время аварий с выбросами в атмосферу радиоактивных веществ или над сейсмоактивными регионами) может большим изменениям основных параметров плазмы D-области приводить к ионосферы. к изменению что, В свою очередь. ведет характеристик распространяющихся в этой области радиосигналов. При этом происходит "короткое замыкание" мезосферного источника ЭДС. Численное моделирование показало, что основную роль в подобной электродинамической перестройке нижней ионосферы играют изменения эффективной частоты соударений и температуры электронов (изменениями электронной концентрации часто можно вообще пренебрегать). Естественно, что описанные выше эффекты не могут наблюдаться в электрически пассивной мезосфере, так как в этом случае предлагаемый механизм тропосферномезосферной электрической связи будет отсутствовать.

# Литература

- 1. R. A. Goldberg, "Middle atmospheric electrodynamics: status and future", J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 46, No. 11, pp. 1083 1101, 1984.
- 2. Ю. А. Брагин, А. А. Тютин, А. А. Кочев, "Прямые измерения напряженности электрического поля атмосферы до 80 км", Космические исследования, Т. 12, вып. 2, сс. 306 308, 1974.
- 3. А. А. Тютин, "Мезосферный максимум напряженности электрического поля", Космические исследования, Т. 14, вып. 1, сс. 143 144, 1976.
- 4. N. G. Maynard, J. P. Heppner, A. Egeland, "Intense variable electric fields at ionospheric altitudes in the high latitude regions as observed by DE-2", Geophys. Res. Lett., Vol. 9, No. 9, pp. 981 984, 1982.
- 5. R. A. Goldberg, "Middle atmospheric electrodynamics during MAP", Adv. Space Res., Vol. 10, No. 10, pp. 209 217, 1990.
- 6. A. M. Zadorozhny, A. A. Tyutin, "Effects of geomagnetic activity on the mesospheric electric fields", Ann. Geophys., Vol. 16, No. 12, pp. 1544 1551, 1998.

- 7. S. I. Martynenko, S. F. Clifford, "On the electrical coupling between the troposphere and the mesosphere", International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, GI, Vol. 6, pp. 1 -6, 2007.
- A. H. Manson, C. E. Meek, S. I. Martynenko, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov, "VLF Phase Perturbations Produced by the Variability in Large (V/m) Mesospheric Electric Fields in the 60–70 km Altitude Range", Characterising the Ionosphere. Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 8. Neuilly-sur Seine, France: RTO. Available from: http://www.rto.nato.int/abstracts.asp., pp. 8-1 – 8-24, 2006.
- 9. I. M. Fuks, R. S. Shubova, S. I. Martynenko, "Lower ionosphere response to conductivity variations of the near-earth atmosphere", J. Atmos. Solar-Terr. Phys., Vol. 59, No.9, pp. 961 965, 1997.
- 10. И. М. Фукс, Р. С. Шубова, "Аномалии СДВ-сигнала как отклик на процессы в приземной атмосфере", Геомагнетизм и аэрономия, Т. 34, № 2, сс. 130 136, 1994.
- 11. С. И. Мартыненко, И. М. Фукс, Р. С. Шубова, "Отклик нижней ионосферы на изменение проводимости приземной атмосферы", Геомагнетизм и аэрономия, Т. 34, № 2, сс. 121 129, 1994.
- 12. S. I. Martynenko, I. M. Fuks, R. S. Shubova, "Ionospheric electric-field influence on the parameters of VLF signals connected with nuclear accidents and earthquakes", J. Atmos. Electricity, Vol. 16, No. 3, pp. 259 269, 1996.
- 13. В. В. Смирнов, "Ионизация в тропосфере", СПб: Гидрометеоиздат, 1992.
- 14. С. И. Мартыненко, "Эффект "охлаждения" области *D* ионосферы под действием возмущенной тропосферной проводимости", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 9, № 2, сс. 217 220, 2004.

## ДИАГНОСТИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАНОРАМНЫХ ВЧ РИОМЕТРОВ

#### В.Г. Безродный

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины Украина, Харьков, 61002, ул. Краснознаменная, 4. e-mail: <u>bezrodny@rian.kharkov.ua</u>

В докладе представлены наиболее яркие результаты применения разработанной в Радиоастрономическом институте НАН Украины (г. Харьков, Украина) и отработанной затем на инструментальной базе Университета Аляски (г. Фэйрбенкс, методики использования панорамных ВЧ риометров в качестве Аляска, США), перспективных экспериментальных установок для диагностики неоднородной структуры различных слоев ионосферы. В соответствии с установившейся научной терминологией (см., например, [1]), панорамные ВЧ риометры (в оригинале- Imaging Riometers) представляют собой радиоприемные устройства, включающие HF многолучевые фазированные антенные системы и выходные радиометры. Такие системы, в своем традиционном использовании, предназначены для мониторинга пространственно-временного распределения поглощения космического электромагнитного фона в нижней ионосфере. Наиболее предпочтительным является их применение в высоких широтах, где вариации поглощения носят нерегулярный характер и стимулируются эффектами высыпания энергичных частиц вблизи полярных овалов. В настоящее время в мире существует 24 панорамных риометра, расположенных в регионах Арктики и Антарктики. Их полный перечень и основные параметры антенных систем приведены на интернет-сайте http://www.dcs.lancs.ac.uk/iono/cgi-bin/riometers.

В последние годы исследователями предпринято ряд попыток расширения круга диагностических задач, решаемых такими многолучевыми риометрами. В частности, в работах [2, 3] теоретически оценена возможность регистрации дополнительного поглощения космического фона в нижней ионосфере под действием ее нагрева высокочастотным излучением. работе [4] возможность мощным В эта экспериментально проверена на основе ретроспективных данных многолетних наблюдений на 49-лучевом риометре, расположенном в Килписъярви (69°03' с.ш., 20°47′ в.д., Финляндия). Авторами [4] надежно подтверждено возрастание поглощения космического фона в периоды включений нагревного стенда. В то же время полученные значения искусственно стимулированного поглощения в луче риометра, пересекающем нагревную область на высотах D-слоя, оказались на порядок ниже теоретически ожидаемых.

Увеличение апертур антенн риометров, И как следствие рост ИХ чувствительности, позволяют в качестве пробного излучения использовать не только пространственно протяженный космический фон, но и мощные дискретные космические источники (ДКИ). Это, в дополнение к перечисленным задачам диагностики нижней ионосферы, открывает возможность наблюдения мерцаний излучения ДКИ на естественных и искусственных плазменных неоднородностях верхней ионосферы. По-видимому, впервые на проявление таких эффектов было указано в работе [5]. Авторами отмечался заметный рост флуктуаций интенсивности дискретного космического источника Кассиопея-А (CasA) в момент прохождения луча зрения на него через область повышенной турбулизации плазмы в F-слое ионосферы,

стимулированной излучением мощного нагревного стенда EISCAT (69°35' с.ш., 19°14' в.д., Тромсо, Норвегия).

Теоретическое и практическое развитие метода ионосферных мерцаний применительно к возможностям панорамных риометров было выполнено научными группами Радиоастрономического института НАН Украины и Университета Аляски, США [6, 7]. Показано, что панорамные ВЧ риометры могут быть успешно использованы для систематической диагностики неоднородностей френелевых масштабов верхней ионосферы и восстановления их пространственно-временных характеристик: интенсивности, спектра размеров, а также скорости движения. Надежные проверки предложенной методики были проведены в [6, 7] с использованием ретроспективных экспериментальных данных, полученных на 256лучевом риометре Покер Флэт (65°06' с.ш, 147°30' з.д.) и нагревного стенда HIPAS (64°52' с.ш., 146°51' з.д.), оба инструмента расположены на Аляске, США. Следует отметить, что эти эксперименты не носили специального характера и были использованы только для демонстрации возможностей диагностики ионосферы на основе регистрации излучения ДКИ с помощью риометрической антенны. В связи с введением в строй в конце 2007 года 64-лучевого риометра Гакона (62°23' с.ш, 145°09' з.д., Аляска, США) появилась и успешно используется в настоящее время возможность наблюдений целенаправленных одновременных ионосферных мерцаний и дополнительного поглощения, стимулированных самым мощным в мире нагревным стендом HAARP (<http://www.haarp.alaska.edu>), расположенным в непосредственной близости от указанного риометра. Предметом настоящего доклада является изложение результатов одного ИЗ таких целенаправленных нагревных экспериментов, датированного 21 февраля 2008 г. Более подробное описание указанного эксперимента можно найти в работе [8].

На рис.1 в полярной системе координат, зенитный угол  $\alpha$  - азимут $\psi$ , изображена многолучевая диаграмма направленности панорамного ВЧ риометра Гакона, Аляска. Штриховые окружности указывают траектории движения четырех наиболее интенсивных ДКИ северного неба, CasA, Syg A, Tau A и Vir A, через лепестки такой диаграммы. Окружность в центре рисунка, выделенная темной заливкой, демонстрирует ориентацию в описываемом эксперименте диаграммы направленности нагревного стенда НААRP. Видно, что вблизи точки верхней кульминации ДКИ Cas A (момента прохождения этим источником направления на юг,  $\psi = 180^{\circ}$ ) диаграмма направленности НААRP имеет достаточно протяженную по азимуту область пересечения с двумя зенитными лепестками риометра.

На рис. 2 приведены результаты первичной обработки записей интенсивности *I*(*t*) излучения ДКИ CasA в наблюдениях 21.02.2008 г.

На рис. 2 приведены результаты первичной обработки записей интенсивности *I*(*t*) излучения ДКИ CasA в наблюдениях 21.02.2008 г.

Темными прямоугольниками вдоль оси абсцисс отмечены периоды включения нагревного стенда (ON), незатемненными участками – интервалы выключения (OFF).

Рисунки За,б и 4а иллюстрируют радиофизические эффекты, связанные с высокочастотным нагревом F-области ионосферы. В частности, рис. За демонстрирует заметный рост крутизны спектральной кривой, полученной усреднением по всем участкам «ON», по сравнению с аналогичной кривой для интервалов «OFF» (рис. 3б).



Рис. 1. Диаграмма направленности панорамного ВЧ риометра Гакона, Аляска



Рис. 2. Результаты первичной обработки временных записей излучения ДКИ CasA в наблюдениях 21.02.2008 г.



Рис. 3. Спектры мерцаний излучения ДКИ Cas A, усредненные по «ON» (a) и «OFF» (б) интервалам активности нагревного стенда в наблюдениях 21.02.2008 г.

Этот рост очевидным образом связан с возрастанием в период нагрева более чем на порядок спектральных составляющих вблизи частоты  $f \sim f_{Fr}$ , обусловленных ионосферными неоднородностями френелевых масштабов, при неизменном уровне более высокочастотных компонент.

Рис. 4а иллюстрирует зависимость индекса мерцаний излучения Cas A от времени в период движения луча зрения на источника через возмущенную область.



Рис. 4 Зависимость индекса мерцаний (а) и дополнительного поглощения излучения (б) ДКИ Саз А от времени в наблюдениях 21.02.2008 г.

Интервалы включения нагрева, как и на рис. 2, выделены на шкале времени темной заливкой. На рисунок нанесена также диаграмма направленности нагревного стенда HAARP,  $G_{Heat}(\alpha = \alpha_s(t))$ , которая может быть использована при сопоставлении уровня мерцаний излучения ДКИ с интенсивностью ионосферного нагрева.

Рис. 4б иллюстрирует эффекты, возникающие под действием ВЧ нагрева в области ионосферы. В частности, гистограмма и сглаживающая ее штриховая линия изображают зависимость дополнительного поглощения  $\Delta A_s$  излучения ДКИ Cas A от времени в процессе движения ДКИ через нагревную область, сплошной линией показана диаграмма направленности нагревного стенда HAARP.

Таким образом, целенаправленные эксперименты по радиопросвечиванию ионосферы излучением дискретных космических источников с использованием в качестве приемного устройства панорамного ВЧ риометра позволяют успешно диагностировать естественные неоднородности, а также искусственные возмущения, возникающие под действием мощного электромагнитного нагрева как в верхней, так и в нижней ионосфере.

## Литература

- 1. D.L. Detrick, and T.J. Rosenberg, "A phased-array radiovave imager for studies of cosmic noise absorption", Radio Science, V. 25, pp. 325-338, 1990.
- А.Б. Пашин, А.Л. Котиков, М.Л. Пудовкин, "Численное моделирование аврорального поглощения в искусственно возмущенной ионосфере", Геомагнетизм и аэрономия, Т. 43, сс. 59-62, 2003.
- 3. C.F. Enell, A. Kero, E. Turunen, Th. Ulich, P.T. Verronen, A. Seppala, S. Marple, F. Honary, and A. Senior, "Effects of D-region heating studied with the Sodankyla Ion Chemistry model", Annales Geophysicae, V. 23, pp. 1575-1583, 2005.
- 4. A. Kero, C.-F. Enell, Th. Ulich, E. Turunen, M.T. Rietveld, and F.H. Honary, "Statistical signature of active D-region HF heating in IRIS riometer data from 1994-2004", Annales Geophysicae, V. 25, pp. 407-415, 2007.
- 5. F.H. Honary, S. Marple, and A. Kavanagh, "Heater-induced Scintillation", In Proc. of 20<sup>th</sup> Anniversary Symposium on Ionospheric Interactions in Tromso, EISCAT Scientific Association, Ramfjordmoen, Norway, 2000.

- 6. В.Г. Безродный, Б. Воткинс, В.Г. Галушко, К. Гровс, А.С. Кащеев, О.В. Чаркина, Ю.М. Ямпольский, "Наблюдение ионосферных мерцаний дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 12, сс. 242-260, 2007.
- 7. V. G. Bezrodny, O. V. Charkina, V. G. Galushko, K. Groves, A. S. Kashcheyev, B. Watkins, Y. M. Yampolski, and Y. Murayama, "Application of an imaging HF riometer for the observation of scintillations of discrete cosmic sources", Rado Sci., 2008, doi:10.1029/2007RS0037
- В.Г. Безродный, О.В. Чаркина, Ю.М. Ямпольский, Б. Воткинс, К. Гровс, "Исследование стимулированных ионосферных мерцаний и поглощения излучения дискретных космических источников с помощью панорамного ВЧ риометра", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 15, сс. 151-163, 2010.

## РАДИОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ХАРЬКОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ В.Н. КАРАЗИНА – СРЕДСТВО ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ В КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ И ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНОВ

#### К. П. Гармаш, В. А. Поднос, В. Т. Розуменко, О.Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина Украина, Харьков, 61022, e-mail: <u>Oleg.F.Tyrnov@univer.kharkov.ua</u>.

#### Введение

Измерения на борту космического аппарата и согласованные наземные наблюдения не просто дополняют друг друга, они позволяют комплексно решить поставленную задачу. С формальной точки зрения ионосфера описывается системой уравнений со многими неизвестными. Чем больше параметров среды будет измеряться в ходе наземно-космического эксперимента, тем точнее будет решена задача.

В нашей стране имеется несколько обсерваторий, в которых длительное время (с 1960 – 1970-х гг.) ведутся систематические исследования физических процессов в ионосфере и околоземном космосе (геокосмосе). Исторически так сложилось, что в окрестности г. Харькова разместились три обсерватории, принадлежащие Харьковскому национальному университету (ХНУ) имени В.Н. Каразина, Институту ионосферы МОНМС и НАН Украины, Радиоастрономическому институту НАН Украины.

Начатые около 50 лет назад исследования геокосмоса в XHV имени В.Н. Каразина, интенсивно продолжаются и в настоящее время. Для этой цели была введена в строй радиофизическая обсерватория (РФО). В ней размещены автоматизированные и компьютеризированные системы дистанционного радиозондирования геокосмоса в широком диапазоне высот ( $z \approx 50 - 1000$  км), которые непрерывно совершенствуются и модернизируются. Ниже дана краткая характеристика этих средств [3–5].

Комплекс дистанционного радиозондирования ионосферы, включающий в себя все размещенные в РФО радиотехнические системы, внесен в реестр научных объектов, которые составляют национальное достояние Украины.

Территориально РФО размещена в Харьковской области вблизи пос. Гайдары (49°38' с.ш., 36°20' в.д.) и пос. Граково ( 49°39'с.ш., 36°56' в.д.).

Уровень научных знаний. За последние десятилетия в мире накоплен большой объем уникальной информации о физико-химических процессах в геокосмосе. Основное внимание уделялось воздействию на геокосмическую среду процессов на Солнце, детально изучались солнечно-земные связи.

Значительно меньше изучено влияние земных процессов под поверхностью, на поверхности и в атмосфере планеты на процессы в геокосмической среде.

Еще меньше исследовано влияние мощных техногенных источников на процессы в околоземной космической среде.

Недостаточно изучено взаимодействие подсистем в системах "Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля – биосфера" (СМСМИАЗБ) и "Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера" (ЗАИМ), устойчивость подсистем к воздействиям со стороны других подсистем, возможности проявления триггерных (спусковых) механизмов энерговыделения.

Недостаточно изучены особенности проявления в геокосмосе воздействий от мощных источников энерговыделения как естественного, так и техногенного

происхождения. Незнание этих особенностей не позволяет производить их селекцию на фоне других воздействий, а значит, и создавать системы своевременного предупреждения о грозящих стране или человечеству опасностях, возникающих при землетрясениях, извержениях вулканов, авариях на энергоемких производствах, военных объектах и т.п.

Поэтому актуальным и перспективным направлением исследований геокосмической среды и вариаций атмосферно-космической погоды является их изучение в рамках системной парадигмы.

Уровень исследований. Основы системной парадигмы, касающейся физики геокосмоса и процессов, протекающих в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), были заложены в Украине еще в 1980-х гг. автором работ [6–10]. Им же организованы и проведены обширные исследования в кооперации с другими научными подразделениями целого комплекса физико-химических процессов в геокосмосе, вызываемых геокосмическими бурями [11, 12], солнечными затмениями [13, 14], движением солнечного терминатора [15], воздействием на ионосферную плазму мощного радиоизлучения [16], стартов и полетов космических аппаратов [15, 17, 18], мощных взрывов [3, 19, 20], техногенных катастроф [19–21], военных действий [16, 21] и т.п., а также исследования состояния геокосмоса в спокойных условиях.

В ходе исследований было установлено или подтверждено, что нестационарные процессы на Солнце, мощное энерговыделение во внутренних и внешних геооболочках, техногенное воздействие приводят к целому комплексу физикохимических процессов во всех геооболочках и в геокосмосе, в частности, к активизации взаимодействий подсистем в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), к перераспределению энергии, вещества между подсистемами и т.п.

Взаимодействие между подсистемами осуществляется при помощи волн [16, 18, 21–23], потоков частиц [24], тепла и т.д.

Цели и задачи исследований. Целью является изучение, моделирование и прогнозирование фундаментальных физико-химических процессов в геокосмосе естественного и техногенного происхождения, влияющих на функционирование средств телекоммуникаций, энергетических систем, производств, на самочувствие и здоровье человека и т.п., а также исследование характеристик распространения радиоволн различных диапазонов.

Задачи исследований, опирающиеся на результаты измерений в ходе реализации наземно-космических проектов, сводятся к следующему.

1. Изучение вклада процессов на Солнце, в космосе и на Земле (естественного и техногенного происхождения) в процессы в геокосмосе в целом и в вариации атмосферно-космической погоды в частности.

2. Разработка эмпирических и теоретических моделей основных процессов в геокосмосе, влияющих на состояние геокосмической среды и атмосферно-космической погоды.

3. Прогнозирование состояния геокосмической среды и вариаций атмосферно-космической погоды.

4. Прогнозирование откликов в подсистемах на высокоэнергетичные процессы, протекающих в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ): землетрясения, вулканическую активность, ураганы, смерчи, цунами и т.п.

5. Прогнозирование экологических последствий запусков и полетов космических аппаратов, воздействия мощного радиоизлучения, мощных взрывов, аварий на энергоемких производствах, военных базах и т.п.

Целью настоящей работы является краткая характеристика РФО ХНУ имени В. Н. Каразина, как средства исследования физических процессов в геокосмосе при наличии естественных и антропогенных возмущений, а также исследование характеристик распространения радиоволн различных диапазонов. Радар предназначен для исследования процессов и получения высотных профилей параметров нижней (60 – 100 км) ионосферы при помощи частично отраженных (ЧО) сигналов. Структурная схема системы приведена на рис. 1. Конструктивно она реализована на базе ПЭВМ с подключенным к ней комплектом аппаратуры "КАМАК", радиоприемного устройства синтезаторного типа Р-399А "Катран", радиопередающего устройства импульсного излучения, синтезатора частоты Ч6-31 и соответствующих блоков управления ими.

Радиопередающее устройство выполнено по двухканальной схеме, имеет мощность до 50 кВт в импульсе на один канал, рабочий диапазон частот 1.5–24 МГц (при неравномерности характеристики 3 дБ) и способно формировать импульсы длительностью от 25 до 100 мкс с частотой повторения до 40 Гц.

Блок управления синтезаторами частоты представляет собой двухканальное устройство, которое позволяет принимать от ЭВМ через стандартный модуль выводного регистра типа 350 аппаратуры "КАМАК" последовательность из 8 слов бинарного кода частоты настройки и формировать необходимый для синтезатора Ч6-31 восьмидекадный позиционный потенциальный код. Кроме того, для реализации импульсного режима модуляции, блок содержит два стробируемых усилителя мощности, на вход которых подается непрерывный сигнал синтезатора, а на выходе формируются радиоимпульсы, частота повторения и продолжительность которых задается либо от внешнего формирователя импульсов, либо формируется программно. Блок позволяет одновременно управлять работой двух синтезаторов частоты Ч6-31.

Блок управления радиоприемными устройствами типа Р-399А "Катран" также представляет собой двухканальное устройство, которое конструктивно выполнено в виде стандартного модуля крейта "КАМАК" двойной толщины. Приемники Р-399А работают в режиме полного дистанционного управления. На время излучения зондирующего импульса входы приемников отключаются от антенн с помощью специального антенного блока, в котором установлены аналоговые ключи. Блок управления позволяет одновременно контролировать состояние двух радиоприемных устройств типа Р-399А "Катран".

Радиоприемное устройство Р-399А "Катран", входящее в состав системы, имеет полосу пропускания усилителя 1-ой промежуточной частоты (ПЧ) шириной 40 кГц, а максимальная ширина полосы усилителя 2-ой ПЧ составляет лишь 10 кГц. Но для получения приемлемой разрешающей способности по высоте (≤ 3 км) следует использовать радиоимпульсы длительностью 20 – 25 мкс и шириной спектра свыше 40 - 50 кГц. Вдобавок к этому коммутационные помехи, которые возникают при срабатывании антенного ключа, имеют значительную амплитуду, что приводит к 2-ой перегрузке штатного усилителя ПЧ при работе с максимальной чувствительностью и длительному процессу его восстановления. По этим причинам был разработан и изготовлен новый стробируемый усилитель 2-ой ПЧ с такими параметрами: полоса пропускания 40 кГц по уровню –3 дБ, коэффициент усиления на частоте 215 кГц достигает 60 дБ.



Рис. 1. Структурная схема программно-аппаратной системы радара частичных отражений. А1 – набор III элементов антенной решетки; А2 – набор VI элементов антенной решетки; А3 и А4 – наборы I и II элементов антенной решетки; А5 и А6 – наборы IV и V элементов антенной решетки; АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина.

Блок синхронизации радара предназначен для формирования основных импульсных последовательностей, необходимых для запуска передающего устройства, а также аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые выполняют оцифровку сигнала с выхода приемника в необходимом высотном диапазоне и с заданным шагом по высоте. Блок содержит пять трехканальных программируемых интервальных скоммутированных с учетом специфики режима таймеров, зондирования (поочередный прием необыкновенной и обыкновенной компонент ЧО сигналов), и конструктивно выполнен в виде стандартного модуля крейта "КАМАК" одинарной толщины. На его вход поступает опорный сигнал TTL уровня частотой 1 МГц, сформированный из стабильного опорного сигнала синтезатора частоты Ч6-31. Таким образом обеспечивается необходимая стабильность временных интервалов при фазовых измерениях.

Оцифровка принятого сигнала осуществляется парой модернизированных быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) типа Ф4226 из состава стандартных модулей комплекта аппаратуры "КАМАК". На их аналоговые

входы поступает сигнал из усилителя 2-ой ПЧ f = 215 кГц приемника, а на цифровые входы – стробирующие и разметочные сигналы из блока синхронизации.

Антенная система радара представляет собой фазированную антенную решетку из 20 элементов, предназначенную для работы в диапазоне частот 1.5 – 4.5 МГц (рис. 2,6). Элементом решетки является двойная вертикальная ромбическая антенна Айзенберга (на рис. 2,а приведено условное графическое изображение элемента). Высота подвеса антенны – 20 м, а ее длина – 150 м.



Рис. 2. Схематическое изображение антенной системы радара: а – схематическое изображение антенного элемента типа двойной вертикальный ромб; б – антенная решетка диапазона частот 1.5 – 4.5 МГц.

Общий размер антенного поля составляет 300×300 м<sup>2</sup>. Элементы антенной системы объединены в такие 6 наборов. Одну линейную поляризацию обеспечивают элементы: 1-2-3-4 (набор I), 5-6-7-8 (набор II) и 17-18 (набор III); другую – 9-10-11-12 (набор IV), 13-14-15-16 (набор V) и 19-20 (набор VI). Условная нумерация элементов приведена на рис. 2,б. Элементы каждого из наборов объединяются между собой фидерными линиями таким образом, что фазовый центр набора совпадает с его геометрическим центром. От фазового центра каждого набора к панели антенного коммутатора проведена отдельная фидерная линия. С помощью этих 6 наборов оперативно формируются разные комбинации антенных решеток для излучения и приема радиосигналов в режиме измерения сигналов частичных отражений (режим "ЧО"), или определения скорости ветрового движения мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации (режим "Ветры").

Передающая антенная решетка в обоих режимах состоит из наборов III и VI, которые подключены к первому и второму каналам импульсного передающего устройства соответственно. Для приема сигналов в режиме "ЧО" наборы I и II одной линейной поляризации включаются параллельно, сигнал с них подается на первый вход блока выделения обыкновенной и необыкновенной поляризаций. Наборы IV и V также соединяются параллельно между собой, сигнал подается на другой вход блока выделения поляризации. Расчетный коэффициент усиления по мощности для этой решетки *G*≈ 200.

В режиме определения скорости дрейфа ионосферных неоднородностей наборы І и ІІ поочередно подключаются к первому входу блока выделения поляризаций, а IV и V – ко второму таким образом, что циклично реализуются все четыре комбинации одновременного подключения наборов ортогональных линейных поляризаций. В результате поочередно формируются четыре антенны круговой поляризации, фазовые центры которых размещены в углах квадрата со стороной около 112 м. С их помощью реализуется пространственно разнесенный прием ЧО радиосигналов, необходимый для последующего расчета пространственных корреляционных функций.

Для согласования импедансов приемно-передающего оборудования с антенными симметрирования используются решетками И широкополосные трансформаторы и делители мощности типа длинная линия, выполненные на ферритовых сердечниках. Соединение элементов антенн между собою и с согласующими трансформаторами выполненно с помощью двухпроводных воздушных и коаксиальных фидерных линий.

Внешний вид приемно-передающего оборудования радара ЧО приведен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид приемного (слева) и передающего (справа) оборудования радара частичных отражений.

## 2. Доплеровский радар вертикального зондирования

Радар вертикального зондирования используется для регистрации динамических процессов в ионосфере на высотах 100 – 400 км, вызванных различными источниками.

Основные параметры радара: диапазон частот f = 1 - 24 МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность зондирующего импульса  $\tau \approx 500$  мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц.

Антенная система представляет собой вертикальный ромб с  $G \approx 1 - 10$  в зависимости от частоты зондирующей волны. При таком потенциале радара отношение сигнал/помеха *q* в ночное время может достигать  $10^5 - 10^6$ . В дневное время *q* обычно на 1 - 2 порядка меньше.



Рис. 4. Внешний вид приемного (вверху) и передающего (внизу) оборудования доплеровского радара вертикального зондирования.

Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратную систему, осуществляющую измерения и предварительную обработку отраженного от ионосферы сигнала в реальном масштабе времени.

Высотная протяженность отраженного сигнала существенно превышает величину  $c\tau/2 \approx 75$  км (c – скорость света в вакууме). Поэтому используется стробирование по высоте с дискретностью  $\Delta z = 75$  км в диапазоне действующих высот z' = 75 - 450 км. В основном канале амплитуда сигнала принимает максимальные значения, в других каналах она была заметно меньше.

Внешний вид приемно-передающего оборудования доплеровского радара вертикального зондирования приведен на рис. 4.

### 3. Цифровой ионозонд

Блок-схема цифрового ионозонда приведена на рис. 5. Он включает в себя доработанные широкополосное радиопередающее устройство "Бриг-2", радиоприемное устройство IC-R75, синтезатор прямого цифрового синтеза (ПЦС) для формирования излучаемых радиоимпульсов нужной частоты и продолжительности, а также микроконтроллерный блок, который осуществляет общую синхронизацию работы

ионозонда, оцифровку принятого радиосигнала и поддерживает связь с внешней персональной вычислительной машиной (ПЭВМ).



Рис. 5. Блок-схема цифрового ионозонда.

Радиопередающее устройство. Зондирующие радиоимпульсы длительностью 100 мкс с частотой следования 125 Гц, несущей частотой в диапазоне 1 – 16 МГц и мощностью до 1.5 кВт в импульсе излучаются широкополосным радиочастотным усилителем мощности передатчика "Бриг-2".

Радиоприемное устройство IC-R75 выполнено по супергетеродинной схеме с тройным преобразованием частоты. Самая широкая полоса пропускания равняется 15 кГц, что достаточно для работы с радиоимпульсами указанной длительности. Входные цепи приемника разработаны для условий функционирования рядом с передатчиками, т.е. имеют достаточный динамический диапазон и цепи защиты от перегрузок. Для дистанционного управления приемником в нем предусмотрен последовательный интерфейс в стандарте RS232 и связной протокол с развитым набором команд. Доработка приемника заключается в установке дополнительных разъемов на корпусе. К одному из разъемов подключается выход усилителя 3-ей промежуточной частоты и дальше этот сигнал подается на амплитудный детектор в микроконтроллерном блоке. Через второй разъем на внутренние цепи подавления импульсных помех подается импульс запирания на время излучения зондирующего радиоимпульса. На антенный вход приемника принятый высокочастотный сигнал подается через антенный ключ, который также запирается на время излучения зондирующего радиоимпульса.

Синтезатор ПЦС выполнен на современной интегральной микросхемной базе и позволяет синтезировать сигнал частотой до 25 МГц, имеет время перестройки с частоты на частоту меньше 1 мкс и способен формировать радиоимпульсы заданной продолжительности. Для установления частоты генерации и режима работы синтезатора используется 24-разрядная связи, по которой шина от микроконтроллерного блока передаются 24-разрядные слова управления. Для формирования ВЧ радиоимпульсов нужной продолжительности в блок синтезатора также поступает соответствующий строб.

Обмен информацией между микроконтроллерным блоком и внешней ПЭВМ происходит по стандартной шине USB.

Антенная система. Ионозонд использует для излучения и приема радиоволн вертикальные широкополосные ромбические антенны Айзенберга. Высота подвеса антенн равняется 18 м, а их горизонтальный размер достигает 50 м.

Внешний вид приемно-передающего оборудования цифрового ионозонда приведен на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид приемного (вверху) и передающего (внизу) оборудования цифрового ионозонда.

### 4. Программно-аппаратная система многочастотного зондирования

Для исследования характеристик радиоволн, отраженных от ионосферы, и нестационарных процессов в ионосферной плазме служит система пассивного наклонного радиозондирования ионосферы. Система может работать в режиме доплеровского радиозондирования с использованием радиосигналов, распространяющихся на наклонных трассах, или в режиме панорамных измерений радиопомеховой обстановки.

Источником сигналов для режима доплеровского зондирования являются станции радиовещания, радионавигации, службы точного времени или же радиоизлучение специализированного радиопередающего устройства.

Режим панорамных измерений основан на анализе в заданном диапазоне частот статистических характеристик мощности электромагнитного поля, которое является суперпозицией узкополосных излучений удаленных радиопередающих устройств различного назначения и шумоподобных радиопомех, генерируемых естественными и искусственными источниками. При этом диапазон частот выбирается относительно широким, чтобы в него с большой вероятностью попадало достаточное количество узкополосных источников радиоизлучения.

Программное обеспечение системы пассивного радиозондирования ионосферы включает набор тестовых программ для проверки и ремонта отдельных узлов блока управления радиоприемными устройствами, измерительные программы для двух вышеупомянутых режимов работы, а также программы для обработки и анализа экспериментальных данных.

Конструктивно система реализована на базе персонального компьютера с подключенным к нему блоком управления радиоприемниками синтезаторного типа Р-399А (для приема радиосигналов в диапазоне 1 – 32 МГц) и Р-391В2 (для приема радиосигналов в диапазоне частот 50 кГц – 2 МГц), блока третьих смесителей частоты с фильтрами нижних частот и синтезатора частоты Ч6-31 в качестве общего 3-го гетеродина, а также распределителя антенного сигнала. Сигнал частотой 5 МГц от опорного генератора одного из приемников является общим для всех остальных приемников, а также для программируемого делителя частоты запуска аналогоцифровых преобразователей (АЦП). Термостатированные опорные генераторы использованных радиоприемных устройств и синтезатора Ч6-31 по паспорту обеспечивают суммарную долговременную относительную нестабильность частотновременных параметров приемной системы не хуже 5.10<sup>-8</sup>. Реальное ее значение почти на порядок меньше.

Режим доплеровского радиозондирования является основным рабочим режимом. Структурная схема системы для этого режима приведена на рис. 7. Блок управления позволяет одновременно управлять состоянием пяти радиоприемных устройств. Этот блок принимает от компьютера через согласующие интерфейсные блоки (БИФ1 и БИФ2) и сохраняет во внутренних регистрах плат управления (ПУ1-ПУ5) бинарные коды информации, которые определяют частоту настройки соответствующего радиоприемного устройства, род его работы, ширину полосы пропускания усилителя промежуточной частоты (УПЧ), коэффициент усиления УПЧ и значение ослабления входного аттенюатора. Для управления коэффициентом усиления каждой плате предусмотрен десятипозиционный цифро-аналоговый УПЧ на преобразователь, каждая следующая позиция которого уменьшает амплитуду выходного сигнала в 2 раза по сравнению с предыдущей. Радиоприемные устройства работают в режиме полного дистанционного управления, что позволяет с помощью одного радиоприемного устройства циклически производить измерения на нескольких (до четырех) радиотрассах со своими уникальными установками усиления для каждой частоты. При этом удается сохранить заданную разрешающую способность как по частоте, так и по времени.



Рис. 7. Структурная схема программно-аппаратной системы пассивного зондирования ионосферы. ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина, БИФ1 и БИФ2 – согласующие интерфейсные блоки, ПУ1-ПУ5 – платы управления приемниками, Р-399А – приемник радиосигналов декаметрового диапазона (пунктирный контур приемника указывает на перспективную возможность его подключения), Р-391В2 – приемник радиосигналов гектометрового диапазона, А – приемная антенна, АР – распределитель антенного сигнала, Ч6-31 – синтезатор сигнала 3-го гетеродина, 3-ий СМ и ФНЧ – блок 3-их смесителей частоти и фильтров нижних частот.

На антенные входы радиоприемных устройств сигнал поступает с распределителя антенного сигнала (АР). С выходов усилителей 2-ой промежуточной частоты приемников радиосигналы частотой 215 кГц и шириной полосы 300 Гц поступают в блок третьих смесителей частоты и фильтров нижних частот (3-ий СМ и

ФНЧ). На выходе фильтров нижних частот присутствуют аналоговые сигналы в полосе частот 0 – 300 Гц. Они преобразуется с помощью 10-разрядных АЦП типа Ф7077М/1, установленных на соответствующих платах управления, в цифровой вид с частотой дискретизации 600 Гц. Поток цифровых данных из АЦП считывается компьютером, работающим под управлением измерительной программы, и производится его дальнейшая программная обработка в реальном масштабе времени. В процессе этой обработки последовательно производится фильтрация данных узкополосным цифровым фильтром и децимация с коэффициентом 15.

Для цифровой фильтрации синтезирован оптимальный полосовой фильтр с конечной импульсной характеристикой. Этому типу фильтров присуща абсолютная устойчивость к различного рода погрешностям данных, они имеют линейную фазовую характеристику и достаточно просто синтезируются по таким заданным параметрам, как длина фильтра, ширина полосы на уровнях пропускания и задержания, а также соотношение неравномерностей амплитудно-частотных характеристик в полосах пропускания и задержания. Здесь оптимальность полосового фильтра понимается в смысле максимального подавления в полосе задержания при заданных параметрах.

Синтезированный цифровой фильтр длиной 120 точек имеет ширину полосы пропускания  $0.04f_N$  на уровне 0.1 (здесь  $f_N$  – частота дискретизации), центральная частота равняется  $0.25f_N$ , а коэффициент подавления внеполосных составляющих превышает 40 дБ. В нашем случае  $f_N = 600$  Гц, поэтому на выходе такого фильтра остается сигнал с центральной частотой 150 Гц и шириной полосы приблизительно 20 Гц.

Следующая затем децимация с коэффициентом 15 преобразует его в сигнал с полосой от 0 до 20 Гц при частоте дискретизации 40 Гц. Собственно эти данные, блоками по 512 точек (или по 12.8 с времени измерения) с описательным заголовком, сохраняются в едином суточном файле экспериментальных данных на компьютере. В заголовке каждого блока данных фиксируется время начала регистрации данного блока и частота принимаемого при этом радиосигнала. Временная привязка данных осуществляется по сигналу GPS приемника.

В перечень функций измерительной программы входит также слежение за уровнем принимаемого радиосигнала и автоматическая корректировка текущих значений коэффициентов усиления УПЧ и входных аттенюаторов приемников для исключения динамической перегрузки или пропадания сигнала. Эти текущие значения учитываются при расчете амплитуды цифровых сигналов, записываемых в файл регистрации.

Обработка данных доплеровского зондирования заключается в выделении из суточного файла блоков данных измерения на конкретной радиочастоте, получении по ним спектральных оценок с заданной точностью и частотным разрешением, выявлении на них основных мод радиосигнала (этими модами могут быть как различные магнитоионные компоненты, так и лучи, отражающиеся от различных ионосферных слоев), а также исследовании динамики этих мод.

Спектральный анализ основывается на параметрическом описании случайного процесса, который порождается суммой отраженных от ионосферы и принятых приемником радиосигналов, а конкретнее на модели авторегрессионного (АР) процесса. Эта модель хорошо описывает данные измерений при ограниченном числе сильных мод и отношении сигнал/помеха порядка или более 10 дБ. Для расчета коэффициентов АР модели реализован метод совместной минимизации квадратичных ошибок прямого и обратного линейного предсказания (модифицированный ковариационный метод). Вычисленные по этим коэффициентам АР спектры позволяют для наших данных определять частоту моды с точностью до 10 – 20 мГц, а разрешение по частоте достигает 60 – 80 мГц.

В случае обработки более низкочастотных (до 150 – 200 кГц) радиосигналов перед АР анализом необходима дополнительная цифровая обработка когерентной

последовательности фрагментов с общей продолжительностью 192 с. Она включает узкополосную (с полосой ~1.33 Гц относительно центральной частоты 10 Гц) фильтрацию данных и перенесение выделенного фрагмента спектра в область 0 – 1.33 Гц. В результате удается определять частоту моды радиосигнала с точностью до 0.6 мГц, а разрешение по частоте может достигать 3 мГц. Результаты численного моделирования свидетельствует, что вариации частот гармоник с учетом точности методики восстанавливаются практически без ошибок, а вариации амплитуд могут приобрести паразитную интермодуляцию в пределах 5 – 10%, синфазную с девиациями частоты гармоник. Однако соотношение между амплитудами восстановленных гармоник близко к истинному.

Режим панорамных измерений. В этом случае блок 3-их смесителей частоты и  $\Phi$ HЧ не используется – вместо него включаются обычные амплитудные детекторы, с выхода которых сигнал подается непосредственно на АЦП. Значение полосы пропускания УПЧ в этом режиме устанавливается 6 кГц, а частота запуска АЦП – 10 кГц. Диапазон сканируемых частот устанавливается равным полному рабочему диапазону приемника, либо его части. Шаг перестройки по частоте составляет 5 кГц. На каждой частоте производится выборка 100 значений амплитуды сигнала, которые затем корректируются в соответствии с текущими показаниями входного аттенюатора и позиции ЦАП регулятора усиления УПЧ, усредняются по амплитуде и мощности, а результаты сохраняются в суточном файле регистрации на компьютере. Максимальная длительность сканирования всех частот в диапазоне 1 – 31 МГц с учетом времен перестройки приемника и измерения не превышает 2 мин. Этот режим является вспомогательным. Он может использоваться как с целью поиска удобных для доплеровских измерений вещательных станций, так и в качестве независимого метода исследования состояния ионосферы по вариациям уровня шумового радиоизлучения.

Мониторинг нижней ионосферы. С целью непрерывного мониторинга нижней ионосферы реализован пассивный метод измерения искажений параметров (амплитуды и фазы) радиосигнала, который распространяется в естественном волноводе, образованном земной поверхностью и нижней ионосферой. Поэтому изучение вариаций амплитудно-фазовых параметров радиосигналов этого диапазона позволяет получить сведения о процессах, которые протекают именно в нижней ионосфере. Для такого мониторинга пригодны сигналы неспециализированных для ионосферных исследований систем навигации и служб эталонных частот и времени, которые работают в низкочастотном (НЧ) и очень низкочастотном (ОНЧ) диапазонах (частоты 10 – 100 кГц). В частности, мы используем сигналы станции РБУ службы эталонных сигналов частоты и времени ( $f=66\frac{2}{3}$  кГц), расположенной вблизи г. Москва

(Россия).

Блок-схема системы, созданной для исследования ионосферных вариаций фазы и амплитуды сигнала станции РБУ, приведена на рис. 8, а ее внешний вид – на рис. 9.



Рис. 8. Блок-схема системы для исследования ионосферных вариаций фазы и амплитуды сигнала станции РБУ. МА – рамочная магнитная антенна; 1 – доработанный приемник-компаратор ПК-66; 2 – измерительно-регистрирующий блок; 3 – рубидиевый стандарт частоты Ч1-69; 4 – USB флэш-накопитель.



Рис. 9. Внешний вид системы для исследования ионосферных вариаций фазы и амплитуды сигнала станции РБУ службы эталонных сигналов частоты и времени. Верхний прибор – приемник ПК-66 с магнитной антенной (слева) и микроконтроллерным измерителем фазы; нижний – рубидиевый стандарт частоты Ч1-69.

Система создана на базе доработанного приемника-компаратора ПК-66. Его выходные сигналы радиочастоты (66 кГц) и цепи автоматической регулировки усиления (АРУ) поступают на разработанный измерительно-регистрирующий блок, в котором осуществляется первичная обработка и регистрация фазо-амплитудных данных.

Для целей автоматизированного измерения искажений характеристик фазы сигналов при их распространении в природном волноводе "земля-ионосфера" выбран аппаратный метод синхронного детектирования усредненных на четвертьпериодных интервалах времени квадратурных компонент сигнала с микропрограммной реализацией определения по ним фазы и устранения неоднозначности обратных тригонометрических интервале углов 360°. функций В 0 Этот метол удовлетворительно работает с зашумленными сигналами и имеет сравнительно простую аппаратную реализацию на современных микроэлектронных элементах. Отсчеты фазы, усредненные на секундных интервалах времени, раз в секунду сохраняются в файлах на внешнем USB флэш-накопителе.

Сигнал с выхода схемы АРУ приемника ПК-66, который несет информацию об амплитуде принимаемого сигнала, также преобразуется в цифровой вид и сохраняется на внешнем носителе вместе с отсчетами фазы.

Стабильность время-частотных параметров системы (значение долговременной относительной нестабильности частоты образцового сигнала порядка  $(1 - 2) \cdot 10^{-11}$  и относительная погрешность установки его частоты не хуже  $10^{-10}$ ) обеспечивает внутренний (FE-5680A) для измерительно-регистрирующего блока, либо внешний (Ч1-69) рубидиевый стандарт частот.

Пример результатов мониторинга космической погоды представлен на рис. 10. Здесь приведены вариации средней фазы (I) и амплитуды (II) отраженного от ионосферы радиосигнала станции РБУ, зарегистрированные в г. Харьков (расстояние до пункта излучения около 720 км в северном направлении) в период 11 – 14 января 2013 г. в околополуденное время суток с 08:00LT по 16:00LT. Геомагнитное поле характеризовалось как спокойное со среднесуточным индексом  $K_{p \text{ max}} = 1$  для 11 – 12 января и  $K_{p \text{ max}} = 3$  для 13 – 14 января. В интервалы регистраций попали две солнечные рентгеновские вспышки класса М1, имевшие место в 09:11UT 11 января и 08:38UT 13 января 2013 г. На рис. 10 также приведены записи вариаций потока солнечного рентгеновского излучения (III) в полосах 0.05 – 0.4 нм (сплошные линии) и 0.1 – 0.8 нм (пунктир), зарегистрированные спутником GOES–15 в это же время. Данные получены со страницы интернет-ресурса www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/lists.html.



Рис. 10. Вариации средней фазы (I) и амплитуды (II) отраженного от ионосферы сигнала станции РБУ (г. Москва), зарегистрированные в г. Харьков в околополуденное время суток с 11 до 14 января 2013 г., а также регистрации потока солнечного рентгеновского излучения (III) в диапазонах 0.05 – 0.4 нм (сплошные линии) и 0.1 – 0.8 нм (пунктир) на спутнике GOES–15.

Из рисунка наряду с суточным ходом фазы и амплитуды радиоволны видна четкая реакция сигнальных параметров на вспышки: кратковременные уменьшения фазы на 100 – 150° и увеличения амплитуды до двух раз. Высокая чувствительность данного средства мониторинга демонстрируется реакцией и на более слабую вспышку С класса, имевшую место 13 января 2013 г. перед основной. Такое поведение параметров радиоволны характерно при образовании слоя ионизации с резким градиентом электронной плотности ниже высоты отражения в невозмущенной ионосфере.

Другой пример результатов мониторинга космической погоды представлен на рис. 11. Одновременный прием сигналов радиостанций "Horizont" (вблизи г. София, Болгария, излучаемая мощность 75 кВт, расстояние около 1300 км) и "Радио России" (вблизи г. Москва, Россия, излучаемая мощность до 2500 кВт, обычно 100–150 кВт, расстояние около 790 км) на частоте 261 кГц производился непрерывно с 24 до 26 мая 2012 г.



Рис. 11. Вариации доплеровского смещения частоты (I) и амплитуды (II) несущей сигнала станции "Horizont", г. София, (сплошная линия) и "Радио России", г. Москва, (пунктир), зарегистрированные вблизи г. Харьков, а также полной напряженности геомагнитного поля (III), потока солнечного рентгеновского излучения в полосе 0.05 - 0.4 нм (IV) и потока энергичных электронов с E>2 МэВ (V) по данным спутника GOES–15 в эксперименте с 24 до 26 мая 2012 г.

Общая геофизическая обстановка в данный период характеризовалась процессами восстановления после магнитной бури средней интенсивности ( $K_{p \text{ max}} = 5$ ), имевшей место в начале суток 23 мая 2012 г. Значение разноса между частотами сигналов несущей составляет ~0.6 Гц, т.е. линии обеих станций одновременно присутствуют в анализируемом спектре и уверенно различаются при спектральной обработке. Первая и вторая сверху панели на рис. 11 иллюстрируют ход их доплеровского смещения частоты (ДСЧ) и амплитуды соответственно. Непрерывная линия приведена для сигнала станции "Horizont", пунктирная – "Радио России". Ионосферный сигнал российской станции теряется на фоне более мощной земной волны, имеющей практически нулевое ДСЧ: за трое суток оно практически линейно изменилось на величину ~ 3 мГц и, по-видимому, связано с долговременной нестабильностью опорной частоты приемно-измерительной системы (относительная суточная нестабильность ~3·10<sup>-9</sup>).

Временные вариации амплитуды не имеют ярко выраженного суточного хода, а их значительная величина может свидетельствовать об интерференции волн. Ионосферный сигнал более удаленной болгарской станции, наоборот, преобладает в месте приема, суточные вариации ДСЧ достигают значения 5 – 8 мГц, а изменение его амплитуды четко отслеживает моменты восхода и захода Солнца на высотах нижней

ионосферы (60 – 90 км). Остальные панели рисунка представляют геофизические данные, зарегистрированные спутником GOES–15 в этот период: напряженность полного геомагнитного поля (третья панель сверху), поток солнечного рентгеновского излучения в полосе 0.05 – 0.4 нм (четвертая панель сверху) и поток электронов с энергией более 2 МэВ (пятая панель сверху). Данные также получены со страницы интернет-ресурса www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/lists.html.

Сопоставление приведенных данных свидетельствует о положительной корреляции между вариациями ДСЧ болгарской станции и потока солнечного рентгеновского излучения в светлое время суток. Определенное сходство вариаций последнего наблюдается и с длинно- и среднепериодными (4–5 часов и менее) изменениями амплитуды сигнала станции "Радио России". Возможно, это связано с возникновением в нижней ионосфере резких слоев повышенной ионизации, уменьшающих эффективную высоту отражения радиоволны и увеличивающих коэффициент отражения. Взаимосвязь вариаций сигнальных параметров с поведением магнитного поля и потока энергичных электронов не обнаружена.

# 5. Многоцелевой комплекс УВЧ-зондирования

Комплекс создан на базе радара ультравысокочастотного (УВЧ) диапазона (рис. 12). Предназначен для исследования геокосмоса в следующих трех основных режимах.

1. Режим мезосферно-стратосферно-тропосферной радиолокации. Предназначен для исследования процессов в нейтральной атмосфере в диапазоне высот 5 – 100 км.

2. Режим некогерентного рассеяния. Этот режим предназначен для исследования процессов в ионосфере в диапазоне высот 80 – 1000 км.

3. Пассивный режим. В этом режиме в качестве информационного выступает радиоизлучение геокосмоса на длине волны λ≈15 см.

Основные параметры многоцелевого комплекса следующие: импульсная мощность радиопередающего устройства – около 100 МВт, диаметр полноповоротной антенны – 15 м, ее коэффициент усиления – около 5 $\cdot 10^4$ , несущая частота – около 2 ГГц, длительность импульса  $\tau \ge 10$  мкс, шумовая температура радиоприемного устройства определяется системой охлаждения до температуры жидкого гелия.



Рис. 12. Внешний вид многоцелевого комплекса УВЧ-зондирования.

### 6. Система приема сигналов навигационных ИСЗ

Исследование ионосферы при помощи сигналов навигационных ИСЗ традиционно проводилось на когерентных частотах 150 и 400 МГц. Для этой цели использовались как низкоорбитные (~ 1000 км), так и высокоорбитные ИСЗ.

В последние годы исследования ведутся при помощи навигационных ИСЗ систем GPS и «Глонасс».

Приемные системы показаны на рис. 13.



Рис. 13. Приемные системы сигналов ИСЗ служб GPS и «Глонасс» (слева), а также сигналов низкоорбитных навигационных ИСЗ (справа).

### 7. Магнитометр-флюксметр

С начала 2001 г. на измерительном пункте в пос. Граково проводятся непрерывные наблюдения вариаций *H*- и *D*- компонент геомагнитного поля при помощи созданной магнитометрической системы. Его основой является индуктивный магнитометр-флюксметр ИМ-II, который изготовлялся малой серией в ОКБ Института физики Земли (ИФЗ) РАН в конце 1980-х гг. Он обладает высокой чувствительностью (0.5 – 500 пТ в диапазоне периодов 1 – 1000 с соответственно) и достаточно широкой полосой исследуемых частот (от 0.001 до 1 Гц). Чувствительность ограничивается уровнем внутренних шумов усилителей активных индуктивных датчиков и динамическим диапазоном использованного аналого-цифрового преобразователя.

Структурная схема магнитометричекой системы приведена на рис. 14. Магнитометр ИМ-II подключен к специализированному микроконтроллерному регистратору (МКР), который производит оцифровку и предварительную фильтрацию с магнитометрических сигналов, а также сохранение на интервалах 0.5 отфильтрованных отсчетов и времени их получения в энергонезависимой USB флэшпамяти. Дополнительно МКР выполняет функции блока бесперебойного питания – он осуществляет контроль заряда аккумуляторной батареи и наличия напряжения в электросети. В случае необходимости активизируется зарядная цепь резервного аккумулятора, переключается питание магнитометрической системы на аккумулятор при пропадании напряжения в электросети, а также производится отключение аккумулятора в случае его глубокого разряда. МКР также получает от приемника GPS сигналов BR-304 стандартные NMEA-сообщения с информацией о текущих дате и транслирует далее систему пассивного многочастотного времени. ИХ на радиозондирования, а также ежесуточно корректирует по ним показания собственных энергонезависимых часов.



Рис. 14. Структурная схема магнитометричекой системы. 12 В, 60 А·ч – аккумуляторная батарея; BR-304 – приемник сигналов GPS; МКР – микроконтроллерный регистратор; ИМ-II – магнитометр-флюксметр; USB флэш-память – энергонезависимый накопитель информации емкостью 4 ГБ.

Мощность, потребляемая системой, составляет примерно 6 Вт, что обеспечивает около 120 часов его автономной работы от аккумулятора. Внешний вид регистратора приведен в левой части рис. 15, а магнитометрической системы в целом – в правой части.



Рис. 15. Внешний вид специализированного регистратора с аккумуляторной батареей и приемником GPS сигналов (фото слева) и магнитометрической системы в пункте наблюдения Граково (фото справа).

регистрируемых Достоверность данных, магнитометром, периодически контролировалась при помощи манитометров ИФЗ РАН, Института геофизики НАН Украины и Радиоастрономического института НАН Украины. В частности, проводилось сравнение с результатами, полученными от неподалеку расположенного аналогичными характеристиками. независимого прибора с Использовались регистрации геомагнитного поля в пункте наблюдения в с. Мартовое Харьковской области, Украина (низкочастотная обсерватория Радиоастрономического института НАНУ), где установлена метеомагнитная станция LEMI-017 разработки Львовского Центра Института космических исследований НАНУ НКАУ с разрешающей способностью по времени 1 с и чувствительностью до 10 пТ. Расстояние между пунктами Граково и Мартовое приблизительно равно 35 км в меридианальном направлении.

Применение методики взаимного корреляционного анализа зарегистрированных вариаций *H*- и *D*- компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов 10 – 100 с на интервалах времени длительностью 1 час показало, что коэффициент корреляции достигал значения 0.99 (особенно для записей *H*- компоненты геомагнитного поля), а величины среднеквадратического отклонения вариаций на разных магнитометрах были

практически равными. Смещения максимумов корреляционных функций не превышали разрешающей способности магнитометров по времени, а именно ±1.5 с.

## 8. Перспективы исследований

Для продолжения регулярных исследований физико-химических процессов в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), вариаций атмосферно-космической погоды, их моделирования и прогнозирования необходимо следующее.

1. Развить и модифицировать существующие средства наземного базирования подспутникового мониторинга, разработать новые средства дистанционного радиозондирования геокосмоса. Разработать методологию согласованных наземно-космических исследований.

2. Провести теоретические исследования, направленные на изучение взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), моделирование и прогнозирование физико-химических процессов в геокосмосе и вариаций атмосферно-космической погоды.

3. Создать пространственно-временные модели основных физико-химических процессов в геокосмосе, взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ), вариаций атмосферно-космической погоды.

4. Разработать методологию, способы и алгоритмы прогнозирования по проявлениям в геокосмосе мощных катастрофических процессов (землетрясений, ураганов, смерчей, цунами и т.п.) и антропогенных воздействий.

5. Получить исходные данные для проектирования оптимизированных средств предупреждения о природных катастрофах и последствиях техногенных воздействий. Разработать высокоэффективные программно-аппаратные средства прогнозирования.

6. Изучить влияние процессов в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ) на самочувствие и здоровье человека и способы минимизации их негативного влияния.

# 9. Применение результатов

Новые сведения о физико-химических процессах в системе СМСМИАЗБ (ЗАИМ) и исследования характеристик распространения радиоволн различных диапазонов имеют мировоззренческий аспект – они помогут по-новому взглянуть на процессы в геокосмосе, лучше понять взаимодействие подсистем, место и роль человека в указанной системе, влияние этих процессов на самочувствие и здоровье человека.

Полученные в ходе исследований новые результаты о процессах в геокосмосе будут иметь научно-познавательное значение – они позволят лучше понять взаимосвязь физико-химических процессов в подсистемах, взаимодействие самих подсистем, их устойчивость к воздействиям, возможность проявления триггерных механизмов высвобождения энергии и т.п.

Практическая значимость планируемых исследований заключается в разработке методологии, способов, алгоритмов И средств прогнозирования влияния высокоэнергетических процессов СМСМИАЗБ В системе (ЗАИМ) на функционирование космических аппаратов, наземных энергетических систем, энергоемких производств, средств телекоммуникаций, транспорта, человека, его самочувствие и здоровье и т.п.

Полученные в ходе исследований новые сведения позволят усовершенствовать систему образования в ведущих университетах Украины – поставить новые курсы, дополнить существующие, подготовить специалистов высшей квалификации.

Разработанные в ходе исследований эффективные средства предупреждения о грозящих природных катастрофах и экологических последствиях техногенных аварий

будут иметь и экономическое значение – будут сэкономлены значительные средства, идущие на ликвидацию последствий катастроф природного и техногенного характера.

Разработанные в ходе исследований эффективные средства предупреждения о грозящих природных и техногенных катастрофах имеют большое социальнообщественное значение. Они позволят сохранить жизнь и здоровье больших контингентов людей.

#### 10. Выводы

1. Радиофизическая обсерватория – современное автоматизированное и компьютеризированное средство исследования физических процессов в геокосмосе в естественных и возмущенных условиях. В РФО ХНУ имени В.Н. Каразина функционирует комплекс дистанционного зондирования, содержащий ряд многоцелевых программно-аппаратных систем, обладающих высокой степенью автоматизации процесса измерений, высокими техническими характеристиками и оснащенных программными средствами, использующими современные методы цифровой обработки данных. Все системы непрерывно модернизируются и совершенствуются.

Обсерватория может функционировать как автономно, так и успешно использоваться для наземного сопровождения космических экспериментов.

2. Выполнены исследования физических процессов в геокосмосе в течение четырёх циклов солнечной активности.

3. Изучены физические процессы, сопровождавшие свыше 300 геокосмических бурь различной интенсивности.

4. Изучены физические процессы, сопровождавшие около 5000 стартов ракет полетов и посадок космических аппаратов. Старты ракет производились с космодромов России, США, Китая и других стран.

5. Изучены физические процессы, сопровождавшие свыше 5000 землетрясений, имевших место с конца 1960-х гг. по 2013 г.

6. Изучены физические процессы, сопровождавшие свыше 300 подземных ядерных взрывов, имевших место на полигонах бывшего СССР, США, Китая, Северной Кореи и других стран.

7. Изучены физические процессы, сопровождавшие работу нагревных стендов.

8. По результатам исследований опубликовано более 2000 научных работ и 30 книг (см., например, [16, 18, 21, 23, 25 – 30]).

### Литература

- 1. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах // Космический проект «Іоносат Мікро»: монографія. К.: Академпериодика, 2013. С. 160 182.
- 2. Chernogor L.F., Blaunshtein N., Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment, New York, Taylor and Francis Group, 2013.
- Garmash K.P., Gokov A.M., Kostrov L.S., Rozumenko V.T., Tyrnov O.F., Fedorenko Y.P., Tsymbal A.M., and Chernogor L.F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 1. Processes in a Naturally Disturbed Ionosphere. Technical Facilities // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – V. 53, No. 4 – 5. – P. 6 – 20. 2. Processes in a Modified Ionosphere. Signal Parameter Variations. Disturbance Simulation // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – V. 53, No. 6. – P. 1 – 22.
- 4. Гармаш К.П., Гритчин А.И., Мартыненко С.И., Поднос В.А., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф., Федоренко В.Н., Федоренко Ю.П., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина: Исследование околоземной космической среды // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»: Материалы конференции 14 18 сентября 2009 г. Севастополь, Крым, Украина, 2009. С. 943 944.
- Гармаш К.П., Леус С.Г., Поднос В.А., Похилько С.Н., Тырнов О.Ф., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф. Модернизированный измерительный пункт Радиофизической обсерватории ХНУ имени В.Н. Каразина // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Радіофізика та електроніка. – 2010. – Вып. 17, № 942. – С. 101 – 108.
- 6. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59 – 106.
- 7. Черногор Л.Ф. Земля атмосфера геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. 2003. Т. 9, №5/6. С. 96 105.
- Черногор Л.Ф. "Земля атмосфера ионосфера магнитосфера" как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, № 12. – С. 655 – 697. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, № 4. – С. 198 – 231.
- Zalyubovsky I., Chernogor L., Rozumenko V. The Earth Atmosphere Geospace System: Main Properties, Processes and Phenomena // Space Research in Ukraine. 2006 – 2008. Kyiv. – 2008. – Pp. 19 – 29.
- 10. Chernogor L.F., Rozumenko V.T. Earth Atmosphere Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System // Radio Physics and Radio Astronomy. 2008. V. 13, № 2. P. 120 137.
- Panasenko S.V., Chernogor L.F. Event of the November 7 10, 2004 Magnetic Storm in the Lower Ionosphere // Geomagnetism and Aeronomy. – 2007. – V. 47, No 5. – P. 608 – 620.
- Chernogor, L.F., Grigorenko Ye.I., Lysenko V.N., and Taran V.I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // Int. J. Geomagn. Aeron. – 2007. – V. 7, GI3001 – doi:10.1029/2005GI000125.
- 13. Chernogor L.F. Effects of Solar Eclipses in the Surface Atmosphere // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2008. V. 44, No 4. P. 432 447.
- 14. Chernogor L.F. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008 // Geomagnetizm and Aeronomy. 2010. V. 50, № 3. P. 346 361.
- Burmaka V.P., Kostrov L.S., Chernogor L.F. Statistics of Signals of the HF Doppler Radar Sensing the Bottomside Ionosphere Disturbed by Rocket Launches and Solar Terminator // Telecommunications and Radio Engineering. – 2004. – V. 61, No 2 – 6. – P. 150 – 177.
- 16. Черногор Л.Ф. О нелинейности в природе и науке. Х.: XHУ имени В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
- Chernogor L.F. Geomagnetic Field Fluctuations near Kharkov, which Accompanied Rocket Launches from the Baikonur Site // Geomagnetism and Aeronomy. – 2009. – V. 49, № 3. – P. 384 – 396.
- 18. Черногор Л.Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. – 386 с.
- 19. Черногор Л.Ф. Взрывы боеприпасов на военных базах источник экологических катастроф в Украине // Екологія і ресурси. 2004. № 10. С. 55 67.
- 20. Черногор Л.Ф. Взрывы на газопроводах и аварии на газовых хранилищах источник экологических катастроф в Украине // Екологія і ресурси. 2008. № 3. С. 56 72.

- 21. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Х.: XHУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
- 22. Burmaka V.P., Taran V.I., Chernogor L.F. Wave-Like Processes in the Ionosphere under Quiet and Disturbed Conditions. 1. Kharkov Incoherent Scatter Radar Observations // Geomagnetism and Aeronomy. – 2006. – V. 46, No. 2. – P. 183 – 198.
- 23. Лазоренко О.В., Черногор Л.Ф. Сверхширокополосные сигналы и процессы. Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. – 576 с.
- 24. Chernogor L.F., Garmash K.P., Rozumenko V.T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Radio Physics and Radio Astronomy. 1998. V. 3, No 2. P. 191 197.
- 25. Черногор Л.Ф. Современная наука о природе: Интегрирующий курс естествознания. Издание второе, дополненное. Х.: ХГУ им. А.М. Горького, 1999. 362 с.
- 26. Черногор Л.Ф. Нелинейная радиофизика. Х.: XHУ имени В.Н. Каразина, 2004. 200 с.
- 27. Чорногор Л.Ф. Нелінійна радіофізика. Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2006. 200 с.
- 28. Черногор Л.Ф. Естествознание: Интегрирующий курс. Издание второе, дополненное и исправленное. Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2007. 536 с.
- 29. Черногор Л.Ф. Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса. Х.: XHУ имени В.Н. Каразина, 2009. 500 с.
- 30. Черногор Л.Ф. Космос, Земля, человек: актуальные проблемы. Х.: XHУ имени В.Н. Каразина, 2010. 192 с.

# ВОСПОМИНАНИЯ О ЮБИЛЯРЕ

### МОЙ ТОВАРИЩ – СЕВА МИСЮРА

#### Я.С.Шифрин

Харьковский национальный университет радиоэлектроники Украина, Харьков, 61166, <u>shifrin@kture.kharkov.ua</u>

С В.А.Мисюрой (для меня просто Севой) я был знаком около 50 лет с 1948 г. и до ухода его из жизни в 1998 г. Однако в своих воспоминаниях я остановлюсь лишь на первых двадцати годах нашего знакомства, когда мы оба работали в военной радиотехнической академии им. Говорова и соприкасались почти ежедневно. Попутно в своих воспоминаниях я кратко коснусь работ, проведенных в академии по исследованию ионосферы, и на людях, которые вели эти работы.

Впервые мы встретились с В.А. в марте 1948 г. в Харькове во время сдачи вступительных экзаменов В адъюнктуру (аспирантуру) Артиллерийской радиотехнической академии. Это был первый набор в адъюнктуру этой молодой академии, созданной за два года до этого, в 1946 г. Всем приехавшим был дан месяц на подготовку к экзаменам. Может быть, этим объясняется то, что приехало человек тридцать. Как выяснилось позднее, большая часть из них и не собиралась сдавать экзамены, а решила просто погулять месячишко в Харькове. Но примерно 8-10 человек имели серьезные намерения и к предстоящим экзаменам готовились напряженно. Это были люди, окончившие разные вузы в разные годы, и поэтому с очень разной подготовкой. Одним из сравнительно хорошо подготовленных абитуриентов был В.А., за плечами (до войны) физфак ХГУ (Харьковского государственного имевший университета) и военную академию им. Н.Е. Жуковского (окончил ее летом 1945 г.). Сдавать надо было три экзамена – по специальности, по иностранному языку и по философии. Первый экзамен, по сути, был определяющим. Тон в приемной комиссии задавал профессор А.И.Ахиезер. Он прекрасно понимал ситуацию, и поэтому главным для него было выяснить, как абитуриент реагирует на дополнительные вопросы, способен ли он к самостоятельной научной работе. И надо отдать ему должное. Все принятые в адъюнктуру семь человек в положенные три года подготовили кандидатские диссертации. И это несмотря на немалые сложности, которые им пришлось преодолеть за время пребывания в адъюнктуре, о чем я скажу ниже.

Назову всех адъюнктов этого первого набора: В.Я.Аверьянов (1919 г.), О.Н.Баранов (1917 г.), С.И.Геллер (1913г), В.И.Кузнецов (1920 г.), В.А.Мисюра (1913 г.), Шифрин Я.С. (1920 г.), В.Ф.Ширяев (1915 г.). Четверо из этого набора (Аверьянов, Кузнецов, Мисюра, Шифрин) впоследствии стали докторами наук, двое (Кузнецов и Ширяев) – генералами. Замечу, что интегрально первые адъюнкты академии сыграли немалую роль в последующем ее становлении. Я бы даже сказал больше – в развитии радиотехнической науки вообще. Остановлюсь кратко на специфике адъюнктуры того времени.

Надо отметить, что жизнь адъюнктов первого набора была много сложнее, чем это имеет место сегодня. Нам надо было сдавать два экзамена по специальности (так называемые «широкий» – по общей радиотехнической подготовке и «узкий» – по выбранной каждым из нас узкой специальности). Особенно сложным был первый из этих экзаменов. Программа по нашей общей подготовке, составленная А.И.Ахиезером и Г.Н.Шеиным, предусматривала изучение большого числа фундаментальных книг (или больших разделов этих книг), в частности таких, как «Теория ИЗ электромагнетизма» Стрэттона, «Теория колебаний» Андронова и Хайкина и т.п. Чтобы все это изучить, требовалось много времени. Кроме экзаменов по специальности, мы сдавали экзамены по двум иностранным языкам, по философии и по спецглавам математики. Соответствующий курс нам читал прекрасный математик Н.С.Ландкоф, ведавший в те годы кафедрой математики нашей академии. У большинства из нас руководителями по диссертации были люди со стороны, да и тему диссертации нам пришлось определять самим. Ученого совета по защитам диссертаций в академии не было, и все мы защищались на стороне. Помимо всего этого, замечу, что почти сразу нас активно привлекли к преподавательской и методической работе. Добавьте к этому не лучшие бытовые условия, и картина жизни нашего набора будет ясной.

Тем не менее, мы не унывали. Трудились весьма напряженно и даже по субботам регулярно собирались с женами выпить и потанцевать. Адъюнктская жизнь наша того времени отражена в известном многим поколениям адъюнктов академии Говорова «Гимне адъюнктов первого набора».

Мы с В.А. были адъюнктами кафедры ТОР (теоретических основ радиотехники). Руководителем нашим был академик А.А.Слуцкин. Когда прошел первый год пребывания в адъюнктуре, надо было определиться с темой научной работы. С этой целью мы с В.А. отправились к нашему руководителю, рассказали ему, что мы сделали за прошедший год, и задали ему вопрос, чем же нам заняться по науке. А.А. предложил нам обоим заняться экспериментальной работой в области магнетронов. Мы, не возражая ему по сути, высказали свое пожелание – нельзя ли в наших темах предусмотреть и теоретическую часть. Абрам Александрович не возражал, и на этом наша беседа мирно закончилась. Каково же было наше удивление, когда назавтра утром нас срочно вызвал к себе разъяренный начальник нашей кафедры Борис Павлович Афанасьев и грозно вопросил: «Что вы там наговорили А.А., что он от вас обоих отказался? Ищите сами себе руководителей». Что нам оставалось делать? В.А. поехал в Москву и обратился с соответствующей просьбой к известному «ионосферщику» Я.Л.Альперту. Тот охотно согласился и, надо сказать, добросовестно выполнял свои обязанности, хотя В.А., насколько я помню, ему особо не докучал. Что же касается меня, то вопрос решился так. Через некое время работавший на нашей кафедре А.И.Ахиезер согласился быть моим научным руководителем. Но, как и обычно это присуще теоретикам, он считал, что аспиранты должны сами «выплывать» из своих диссертационных дел. В конечном счете, я справился с этой задачей и, более того, со временем стал одним из близких друзей А.И. (о чем пишет в своих воспоминаниях его дочь Зоя). Как бы то ни было, к окончанию срока адъюнктуры диссертации у нас обоих были готовы. Надо было искать место защиты. Сами мы мало кого знали, а начальство наше не беспокоилось. Так прошел почти год. В апреле 1952 г. поступила информация, что с 1 сентября 1952 г. в нашей академии заработает свой ученый совет по присуждению ученых степеней. Мы с В.А. обрадовались. Но, как оказалось, преждевременно. В мае стало известно, что в академию едет комиссия ЦК КПСС, имеющая своей задачей выяснить, как готовятся научные кадры в молодой академии. Это известие встревожило начальство, и оно решило избавиться от залежавшихся дисертаций. Нам с В.А. было предложено отправить свои работы в Москву, в академию им. Жуковского, где якобы имелась договоренность о нашей защите летом. Наши возражения, что мы быстрее защитимся у себя, успеха не имели, и наши диссертации вытолкнули в Москву. В конечном счете, мы там и защитились, хотя это стоило нам немалых дополнительных трудностей.

По окончании адъюнктуры В.А. был назначен старшим преподавателем кафедры ТОР, а через некоторое время – ее начальником. Наряду с преподавательской и организаторской работой он продолжал активно заниматься наукой, а где-то в начале 60-х гг. стал научным руководителем созданной на моей кафедре – кафедре АФУ и РРВ (антенно-фидерных устройст и распространения радиоволн) штатной проблемной ионосферной лаборатории (НИЛ-2).

Основным научным направлением В.А. на первых порах было изучение влияния ионосферы на параметры радиолокационных систем. Впоследствии, когда В.А. стал руководить работой НИЛ-2 и особенно с переходом в ХГУ и созданием им там мощной экспериментальной базы, круг его научных интересов существенно

расширился. Центральным в работе В.А. и руководимого им коллектива стало развитие различных радиофизических методов исследования ионосферы, изучение с помощью этих методов структуры ионосферы и происходяших в ней физических процессов, вопросов влияния мощных электромагнитных импульсов на ионосферу и т.д. Но даже и при этом вопросы влияния ионосферы на работу РЛС оставались в числе важнейших.

В первые годы работа В.А. носила теоретико-расчетный характер. В основе этих расчетов лежала некая модель ионосферы, тот или иной закон распределения плотности электронов с высотой. Этот вопрос волновал ионосферщиков многие годы с момента появления ионосферных станций. Последние, как известно, позволяют определить строение ионосферы до максимума слоя  $F_2$ . Ну, а что будет выше? В начале 1943 г. я, будучи слушателем военной академии связи, располагавшейся тогда в г. Томске, присутствовал на защите кандидатской диссертации начальника кафедры военных радиостанций академии Я.М.Рубинштейна, посвященной построению «очередной» модели ионосферы выше максимума слоя  $F_2$ . Естественно, что и В.А. уделил этому вопросу немалое внимание. Сами расчеты выполнялись в созданном тогда в нашей академии расчетном бюро, где сидело с десяток девушек, вооруженных механическими арифмометрами. Замечу, что вопрос о сквозной модели ионосферы получил свое решение лишь с появлением спутников где-то в 1958 г. Сотрудник ИКИ (Института космических исследований) К.И.Грингауз получил за это докторскую степень.

Как я уже писал выше, с начала 60-х годов В.А. стал научным руководителем НИЛ-2. Под его руководством было выполнено много разных НИР. Помимо оценки влияния ионосферы на работу различных радиотехнических систем, сотрудники НИЛ-2 занимались также разработкой и практической реализацией новых методов получения информации о структуре и параметрах ионосферы и другими вопросами. Как правило, эти работы выполнялись в рамках союзного плана НИР, который, по заданию военных, составляла так называемая комиссия прикладных проблем при АН СССР. Зачастую эти работы заметно дублировали друг друга. Помимо этих работ выполнялись и хоздоговорные работы с разными крупными московскими НИИ. Так что общее число выполняемых работ было весьма значительным. Я не буду останавливаться подробно на разборе этих работ. Но я хотел бы назвать фамилии ряда ведущих сотрудников НИЛ-2, которые (помимо В.А.) внесли определяющий вклад в достижения этого коллектива. Это – многолетний начальник этой лаборатории, много сделавший на этапе ее становления, высоко порядочный человек А.Н.Гридин, последующий ее начальник доктор наук Г.К.Солодовников, доктор наук (впоследствии генерал) Г.Н.Ткачев, работающий ныне в Москве в НИИДАРе по проблеме ЗГРЛ, кандидаты технических наук А.И.Купавский, В.М.Мигунов, Е.Б.Крохмальников. Помимо указанных сотрудников НИЛ-2, я считаю своим долгом назвать еще ряд хороших ученых, работавших на моей кафедре (не в НИЛ-2), внесших заметный вклад в науку об ионосфере. Это доктора наук Ф.Б.Черный, Н.Н.Минервин, В.И.Новожилов и к.т.н. Э.Ш.Гойхман. Несколько слов о каждом из них.

Ф.Б. Черный. Окончил до войны ХГУ, в начале войны, будучи аспирантом МГУ (Московского государственного университета), добровольно ушел на фронт. Геройски прошел войну. Был командиром противотанковой батареи, несколько раз ранен, включая тяжелое ранение, награжден тремя боевыми орденами. Вся послевоенная жизнь его прошла в академии им. Говорова. Написал хороший учебник по распространению радиоволн, в котором немало места уделено и ионосфере. Докторская диссертация Ф.Б. была посвящена исследованию распространения метровых волн в протяженном волноводе ионосфера-Земля в интересах ЗГРЛ.

*Н.Н.Минервин*. Выпускник МГУ. Практически всю свою жизнь работал в академии им. Говорова и Харьковском университете воздушных сил. Талантливый, глубокий ученый и замечательный человек. Один из наиболее квалифицированных в

СНГ специалистов по вопросам влияния ионосферы на работу РЛС. Автор соответствующих разделов в двух фундаментальных справочниках по радиоэлектронике, вышедших под ред Я. Д Ширмана.

*В.И.Новожилов*. Талантливый ученый, автор ряда хороших работ в области радиофизических методов исследования ионосферы. Защитил докторскую диссертацию по этим вопросам. Увы, сразу же после защиты диссертации ушел из жизни.

Э.Ш.Гойхман. Много лет успешно работал по вопросам ЗГРЛ. К сожалению, под надуманным предлогом накануне завершения им докторской диссертации был выдворен из академии Говорова.

Кроме двух указанных выше групп ученых, входивших в состав кафедры АФУ и надо указать еще и сотрудников отдельной лаборатории, НИП-2, также PPB. занимавшихся исследованиями ионосферы. Формально эта лаборатория являлась лабораторией московского НИИДАРа. Это была первая в истории академии им Говорова «чужая» лаборатория, созданная мною в 1979 г. по договоренности с директором НИИДАРа, генеральным конструктором систем ЗГРЛ Ф.А.Кузьминским. Существенно, что научная тематика этой лаборатории определялась нами. Она предусматривала исследование трех групп вопросов: возвратно-наклонного зондирования атмосферы и нелинейных эффектов в ней, особенностей работы антенн и возможностей их фазовой оптимизации, а также разработки устройств ЗГРЛ помехозащиты ЗГРЛ. Исследования по первому направлению велись, в основном, доктором наук В.И.Новожиловым и к.т.н. В.М.Мигуновым, по второму – доктором наук Л.Г. Корниенко и к.т.н В.И.Локтиным, а по третьему – к.т.н. Э.Ш.Гойхманом и инженерами А.П. Колядой и Б.А.Довбней. В своей работе коллектив НИП-2 тесно сотрудничал с учеными-ионосферщиками кафедры АФУ и РРВ, сотрудниками ННИДАРа Э.И.Шустовым и В.А.Алебастровым и коллективом кафедры В.А.Мисюры в ХГУ.

Вернусь теперь непосредственно к нашему юбиляру. Обычно принято: об ушедшем говорить только хорошее или ничего. Но юбилей - это не похороны, и мне кажется, что мои воспоминания о В.А.Мисюре будут неполными, если не коснуться его человеческих качеств. Для многих людей, знавших его, не является секретом то, что В.А. был человеком сложным, что, впрочем, нередко присуще неординарным людям. Он был довольно упрямым и категоричным человеком, порою несправедливым к подчиненным, порою излишне резким в отношениях с коллегами, иногда даже в ущерб работе. Мне, как его товарищу, не раз приходилось беседовать с ним, убеждая В.А. смягчить его необъективную позицию в тех или иных делах, хотя не могу сказать, что я был в этом успешен. Несомненно, однако, что все эти недостатки в характере В.А. перекрывались его достоинствами – редкой целеустремленностью, настойчивостью и пробивной способностью, активной преданностью науке. Эти его качества развернулись в полной мере, когда В.А. перешел в университет и создал кафедру космической радиофизики, которая живет и процветает уже более сорока лет. Особо надо отметить его многолетние усилия по созданию уникального полигона в Гайдарах, являющегося национальным достоянием Украины. Мало найдется людей, у которых хватило бы такой настойчивости и такой пробивной способности, какие проявил В.А., на то, чтобы поднять это дело,

К сказанному выше о человеческих качествах В.А. нельзя не добавить, что он был страстным охотником, одним из наиболее известных в Харькове. Среди его компаньонов и друзей по охоте был и А.В.Погорелов.

Заканчивая на этом свои воспоминания о В. А. Мисюре, я хотел бы отметить, что его имя, несомненно, войдет (да оно уже вошло) в историю науки об ионосфере. Память о нем сохранится на долгие-долгие годы в полученных им научных результатах, в делах созданной им кафедры, работах его многочисленных учеников.

## К 100-ЛЕТИЮ В.А. МИСЮРЫ (Воспоминания)

#### Г.Н.Ткачев

Открытое акционерное общество «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи» Россия, 107258, Москва, kbn@niidar.ru

Мое первое знакомство с Всеволодом Александровичем состоялось осенью 1964 года, когда я был переведен в научно-исследовательскую лабораторию № 2 (НИЛ-2). Начальником лаборатории был Гридин Анатолий Николаевич, а научным руководителем Мисюра Всеволод Александрович.

В те далекие годы в СССР создавалась система предупреждения о ракетном нападении (СПРН), и поэтому интерес к ионосферным исследованиям был огромный. Инициатором подобного рода исследований в Академии имени Л.А.Говорова был Всеволод Александрович Мисюра. Под его руководством НИЛ-2 занималась исследованием широкого круга вопросов, в том числе:

- разработкой методического аппарата для оценки влияния ионосферы на работу радиотехнических систем различного функционального предназначения, включая оценку этого влияния на конкретные радиотехнические системы (по заданиям заказчиков работ);
- разработкой и практической реализацией новых методов получения информации о структуре и параметрах ионосферы (с использование спутников, геофизических ракет, высокопотенциальных радиолокационных станций и др.).
- изучением последствий антропогенного воздействия на ионосферу и др.

Научная работа для Всеволода Александровича была всепоглощающей страстью, хотя все человеческое ему было также не чуждо – Всеволод Александрович был заядлым охотником. Кабинет, где работал Всеволод Александрович, был совсем маленький. Никаких особых привилегий для себя он не требовал.

Что осталось у меня в памяти от работы под руководством Всеволода Александровича? Наиболее яркие (на мой взгляд) эпизоды.

Повышенная требовательность к себе и своим ученикам.

Как-то раз в одном из отчетов о НИР, уже отправленных Заказчику, была обнаружена техническая ошибка. Немедленно была организована командировка исполнителя и ошибка была тут же исправлена. Исполнитель, допустивший ошибку, получил заслуженное наказание.

1967 год. Получены первые результаты измерений параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния. В СССР это были первые измерения. Предстоит выступить на научной конференции. Но ведь это всего лишь первая «проба пера», нужны для сравнения данные измерений другими методами. Мне поставлена задача: срочно связаться с сектором ионосферы в Казахстане и «добыть» данные вертикального ионосферного зондирования в заданной точке пространства и в заданное время. Требование: сегодня – постановка задачи, завтра – самолет, поезд, автобус, и через 5 дней должен быть результат. Таким был Всеволод Александрович всегда и со всеми своими учениками.

<u>Научные конференции</u>. Подготовка к ним проводилась под жестким контролем Всеволода Александровича. Никто из сотрудников НИЛ-2 не мог «увильнуть» от **обязанности** выступить на научной конференции. При этом отговорки типа «нет достойных результатов» означали автоматическую оценку твоей работы: «плохо работаешь». Тексты выступлений и иллюстрации к ним тщательно готовились. Накануне выезда на конференцию проводилось заслушивание выступающих. Для того чтобы ничего не пропустить интересного на конференции, заранее «расписывалось» кто и на какую секцию пойдет. Вечером проводился сбор всех участников, обмен впечатлениями и постановка задач на следующий день. В общем, это была хорошая школа для нас, в то время, совсем молодых инженеров и младших научных сотрудников.

В.А.Мисюра был известен как специалист в области ионосферного распространения радиоволн далеко за пределами Харьковской академии. Поэтому не удивительно, что, когда на одном из объектов Министерства обороны возникли вопросы, связанные с влиянием ионосферы на работу РЛС, В.А. был приглашен для консультаций. Мне посчастливилось сопровождать его в этой поездке.

<u>О настойчивости</u> Всеволода Александровича. Как-то раз мы были вместе у Генерального Заказчика. Просили разрешения у генерала М.И.Ненашева на проведение экспериментов на одном из только что построенных объектов системы ПРН. Нам отказали. Я «нос повесил», но Всеволод Александрович меня приободрил: ничего, через час снова «постучимся». На третий раз нам разрешили.

<u>1970 год.</u> Примерно в это время по инициативе Всеволода Александровича в Харьковском государственном университете была создана кафедра космической радиофизики. Всеволод Александрович читал там лекции. Вполне естественно, что он и нас приобщил к этому виду деятельности. Мы, молодые офицеры, проводили практические занятия и руководили работой дипломников университета. Для нас это также была в определенном смысле школа, школа «общения с гражданской молодежью», как любил говорить начальник академии маршал артиллерии Бажанов Ю.П.

Многие студенты из первого выпуска кафедры космической радиофизики ХГУ стали впоследствии крупными учеными.

У Всеволода Александровича было много учеников не только в Академии имени Говорова и в ХГУ, но и в войсках. Некоторые их них не только достигли уровня квалификации доктора наук, но и стали видными военачальниками, как, например, капитан Ерохин Юрий Гаврилович, впоследствии ставший генерал-лейтенантом и начальником 45-го института МО СССР.

Вспоминая былое, хочется еще отметить немаловажную деталь. Всеволод Александрович всегда был «окружен» молодежью, как на работе, так и на отдыхе.

<u>1974 год</u>. Научная конференция по ионосфере во Львове. После ее окончания – поездка по Закарпатью. Весь путь мы пели песни и, разделившись на две группы, соревновались в пении. Одну группу «энтузиастов пения» возглавлял П.В. Блиох, вторую – В.А. Мисюра.

С замечательным человеком меня свела судьба.

# СОДЕРЖАНИЕ

1. ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ
1.1. Ю. М. Ямпольский. РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРНО- МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НА АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ» 4
1.2. В.Л. Фролов. СВОЙСТВА ИСКУССТВЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ ЕЁ МОДИФИКАЦИИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ
1.3. А. Д. Данилов. ТРЕНДЫ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ И ВЫСОТЫ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F2 КАК ЧАСТЬ КОНЦЕПЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ И ОСЕДАНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ 10
1.4. О.К. Черемных, В. Н. Ивченко. ИССЛЕДОВАНИЯ УНЧ-ВОЗМУЩЕНИЙ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОЕКТЕ «РЕЗОНАНС»
1.5. А. П. Николаенко. ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАНСЫ: НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАФЕДРЕ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОФИЗИКИ РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА ХГУ 12
1.6. Л. Ф. Черногор. ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА В СИСТЕМЕ ЗЕМЛЯ – АТМОСФЕРА – ИОНОСФЕРА – МАГНИТОСФЕРА
2. СЕКЦИОННЫЕ ДОКЛАДЫ
2.1. И.Ф. Домнин, Л.Я. Емельянов, Л.Ф. Черногор. ДИНАМИКА ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ НАД ХАРЬКОВОМ В 1999–2011 гг
2.2. А.А. Намгаладзе, М.И. Карпов. ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ КАК ИНДИКАТОР ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
2.3. Е.В. Конецкая, М.В. Тинин. УЧЕТ ИОНОСФЕРНОЙ ОШИБКИ ВТОРОГО ПОРЯДКА И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ В ДВУХЧАСТОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ
2.4. В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор, В. П. Бурмака. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ СТАРТЫ И ПОЛЁТЫ МОЩНЫХ РАКЕТ

2.5. О.Ф. Тырнов, Ю.П. Федоренко, В.Н. Федоренко, В.Л. Дорохов ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АГВ-ПИВ И ЕЁ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА
2.6. Л.Ф. Черногор, Ю.Б. Милованов, В.Н. Федоренко, А.М. Цымбал. ВОЗМУЩЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫЕ ПАДЕНИЕМ ЧЕЛЯБИНСКОГО МЕТЕОРОИДА
2.7. Е.М. Занимонский. МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ СПОКОЙНОЙ И ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ НА ВЫСОКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТАХ
2.8. И. Г. Захаров. СВЯЗЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ОБЛАСТИ F2 ИОНОСФЕРЫ ОТО ДНЯ КО ДНЮ С ПРОЦЕССАМИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ТРОПОСФЕРЕ
2.9. К.П. Гармаш, С.Г. Леус, С.Н. Похилько. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ ИОНОСФЕРНОГО СИГНАЛА СТАНЦИИ РБУ
2.10. Т.Г. Живолуп. ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ВАРИАЦИИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЯ F1 ИОНОСФЕРЫ
2.11. С.В. Гринченко, Д.А. Дзюбанов. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В F2-ОБЛАСТИ
2.12. С.И. Мартыненко. ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНАЯ МЕЗОСФЕРА И ТРОПОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫЕ СВЯЗИ
2.13. Н.Н. Калиниченко, И.С. Фалькович, А.А. Коноваленко, А.И. Браженко. РАЗДЕЛЕНИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОИСТОЧНИКОВ
2.14. А. М. Гоков, О. Ф. Тырнов. ВОЗМУЩЕНИЯ СРЕДНЕШИРОТНОЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННЫЕ ПОТОКАМИ МЕТЕОРОВ65
2.15. С.И. Мартыненко, О.Ф. Тырнов, В.Т. Розуменко. ВАРИАЦИИ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ 68
2.16. И. Г. Захаров. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В РАДИОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ
2.17. Д.О. Батраков, Д.В. Головин, О.Д. Батраков. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД
2.18. С.И. Мартыненко, В.Т. Розуменко, О.Ф. Тырнов. ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИЗЕМНОЙ ПРОВОДИМОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНОЙ МЕЗОСФЕРЕ

2.19. В.Г. Безродный. ДИАГНОСТИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАНОРАМНЫХ ВЧ РИОМЕТРОВ
2.20. К. П. Гармаш, В. А. Поднос, В. Т. Розуменко, О.Ф. Тырнов, Л. Ф. Черногор. РАДИОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ХАРЬКОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ В.Н. КАРАЗИНА – СРЕДСТВО ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ В КОСМИЧЕСКИХ И НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ И ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН РАЗЛИЧНЫХ
ДИАПАЗОНОВ
3. ВОСПОМИНАНИЯ О ЮБИЛЯРЕ
3.1. Я.С.Шифрин. МОЙ ТОВАРИЩ – СЕВА МИСЮРА 112
3.2. Г.Н. Ткачев. К 100-ЛЕТИЮ В.А. МИСЮРЫ (Воспоминания) 116