

## Направление 7. ИОНОСФЕРА

Координаторы: В.Д. Кузнецов (ИЗМИРАН), М.И. Веригин (ИКИ РАН)

7.1	Проект 7.1: Эффективные индексы солнечной и геомагнитной активностей для параметров ионосферы	ИЗМИРАН	Деминов М.Г.
7.2	Проект 7.2: Особенности F области низкоширотной и экваториальной ионосферы в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь	ИЗМИРАН	Карпачев А.Т.
7.3	Проект 7.3: Пространственная структура и динамика проявления флуктуаций ГЛОНАСС/GPS сигналов в Арктике и их влияние на точность позиционирования	ЗО ИЗМИРАН	Шагимуратов И.И.
7.4	Проект 7.4: Экспериментальное исследование реакции полярной ионосферы на вторжения энергичных частиц магнитосферного происхождения с помощью трехкомпонентной установки для измерения ОНЧ излучений. Исследование экстремальных проявлений солнечной активности по данным наземной сети нейтронных мониторов	ПГИ КНЦ РАН	Федоренко Ю.В., Балабин Ю. В.

### **Проект 7.1. Эффективные индексы солнечной и геомагнитной активностей для параметров ионосферы.**

#### **Тема 7.1.1. Эффективные индексы солнечной и геомагнитной активностей для параметров ионосферы**

**Аннотация.** Установлено, что индекс геомагнитной активности для медианы критической частоты F2-слоя ионосферы средних широт систематически меньше среднего за месяц значения этого индекса.

Считают, что медиана за месяц критической частоты F2-слоя  $foF2$  является оптимальной характеристикой этой концентрации в прогнозе регулярных (климатических) изменений ионосферы. В качестве приближенной характеристики геомагнитной активности для медианы  $foF2$  часто принимают среднее за месяц значение этой активности, поскольку обычно неизвестен конкретный день месяца, который соответствует этой медиане (для определенности будем считать, что число дней месяца, использованных для вычисления этой медианы, нечетно).

Нами предложен другой вариант, который связан с последовательным определением даты, в которую значение  $foF2$  равно медиане, индекса геомагнитной активности для этой даты и, тем самым, соответствия конкретной медианы  $foF2$  для данного месяца и

мирового времени конкретному уровню геомагнитной активности. Полученный таким способом индекс назван точным индексом геомагнитной активности для медианы foF2. В качестве такого точного индекса использован индекс  $ap(\tau)$  – средневзвешенное (с характерным временем 14 часов) значение ар-индекса геомагнитной активности в выделенный день для данного мирового времени, который отражает вклад геомагнитной активности в foF2, в основном, из-за джоулева нагрева термосферы в авроральной области. В качестве приближенного индекса активности использован индекс  $A_{pm}$  – среднее за месяц значение Ар-индекса геомагнитной активности. Главной целью данной работы был анализ свойств такого точного индекса геомагнитной активности для медианы foF2.

На основе анализа данных критической частоты F2-слоя foF2 станций Слау и Чилтон за 1954–2013 гг. установлена связь индексов солнечной и геомагнитной активности для медианы foF2 за месяц со средними значениями этих индексов. Получено, что нет систематической разницы между индексом солнечной активности для медианы foF2 и средними за 81 день или 1 год значениями индекса этой активности. Случаи, когда медиана foF2 соответствует высокой геомагнитной активности, встречаются примерно в 3-4 раза реже случаев наблюдения такой высокой активности (рис. 1). Поэтому в среднем геомагнитная активность, которая соответствует медиане foF2, меньше среднего за месяц значения этой активности, и эта разница увеличивается с ростом геомагнитной активности. Характеры связей индексов солнечной и геомагнитной активностей для медиан foF2 со средними значениями этих индексов почти совпадают для периодов относительно высокой (1954–1995 гг.) и низкой (1996–2013 гг.) солнечной и геомагнитной активности.

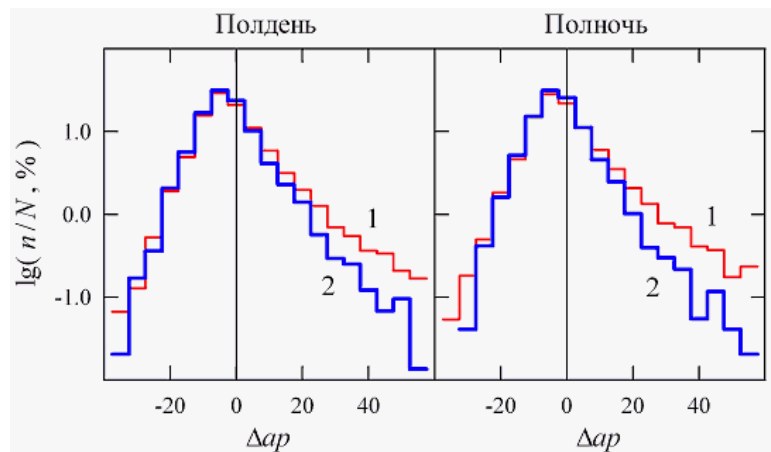


Рис. 1. Гистограммы отклонений  $ap$ -индексов геомагнитной активности от их среднего значения за 1954-1995 гг. в полдень и полночь для середин месяцев (1) и для дат месяцев, которые соответствуют медиане foF2 ионосферной станции Слау (2).

**Руководитель темы:** Деминов М.Г., д.ф.-м.н., ИЗМИРАН, deminov@izmiran.ru.

**Состав группы:** Бадин В.И., Деминова Г.Ф., Деминов М.Г., Шубин В.Н.

**Публикации:**

1. Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Какой солнечной и геомагнитной активности соответствует медиана критической частоты F2-слоя на средних широтах? // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 3. С. 343-349.
2. Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А., Полех Н.М. Свойства изменчивости концентрации максимума F2-слоя над Иркутском при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 1. С. 56-62.
4. Деминов М.Г. Выбор индекса солнечной активности для долгосрочного прогноза ионосферы // 10 конф. "Физика плазмы в Солнечной системе" (Сборник тезисов). М.: ИКИ РАН, 2015. С. 74.
5. Бадин В.И. Резонансное поглощение УНЧ сигналов по доплеровским радарным данным // 10 конф. "Физика плазмы в Солнечной системе" (Сборник тезисов). М.: ИКИ РАН, 2015. С. 86.

**Тема 7.1.2. Долговременные изменения параметров термосферы и ионосферы Земли**

**Аннотация.** Обосновано, что декабрьская аномалия в F2-слое связана с увеличением содержания атомного кислорода в атмосфере Земли, вызванного уменьшением расстояния от Земли до Солнца в декабре.

Одним из факторов долговременных изменений параметров термосферы и ионосферы является так называемая декабрьская аномалия в F2-слое – глобальное увеличение концентрации максимума этого слоя NmF2 вблизи декабрьского солнцестояния. Это явление известно со времени начала ионосферных наблюдений, т.е. более 70 лет, однако до настоящего времени не было предложено удовлетворительного механизма для его объяснения. Получение решения этой задачи было главной целью данного этапа работ.

Показано, что декабрьская аномалия в F2-слое связана с увеличением содержания атомного кислорода в атмосфере Земли, вызванного уменьшением расстояния от Земли до Солнца в декабре. Годовая асимметрия в нейтральном составе и температуре верхней атмосферы Земли отражена в эмпирических моделях MSIS86 и MSISE00, что совместно с 7% увеличением потока солнечного EUV оказывается достаточным для объяснения декабрьской аномалии NmF2, по крайней мере, на фазе минимума солнечной активности (2008-2009 г.г.). Предложен механизм увеличения содержания атомного кислорода в атмосфере Земли с приближением к декабрьскому солнцестоянию. В основе его лежит эффект накопления атомного кислорода в связи с разными характерными временами его образования и гибели.

**Руководитель темы:** Михайлов А.В., д.ф.-м.н., ИЗМИРАН, [mikhailov71@gmail.com](mailto:mikhailov71@gmail.com)

**Состав группы:** Лещинская Т. Ю., Михайлов А.В.

**Публикации:**

1. Mikhailov, A. V., Perrone L. The annual asymmetry in the F2 layer during deep solar minimum (2008–2009): December anomaly // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120, 1341–1354, doi:10.1002/2014JA020929.
2. Mikhailov A.V., Perrone L., Shubin V.N. Euromap foF2 short-term (1-24) prediction model based both on historical and real-time foF2 observations over the European region // 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC 2015) 18-22 May 2015. P. 37.

**Проект 7.2. Особенности F области низкоширотной и экваториальной ионосферы в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь**

**Тема 7.2.1. Особенности F области низкоширотной и экваториальной ионосферы в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь**

**Аннотация.** По данным спутника Интеркосмос-19 построена эмпирическая модель экваториальной аномалии в критической частоте F2-слоя для высокой солнечной активности.

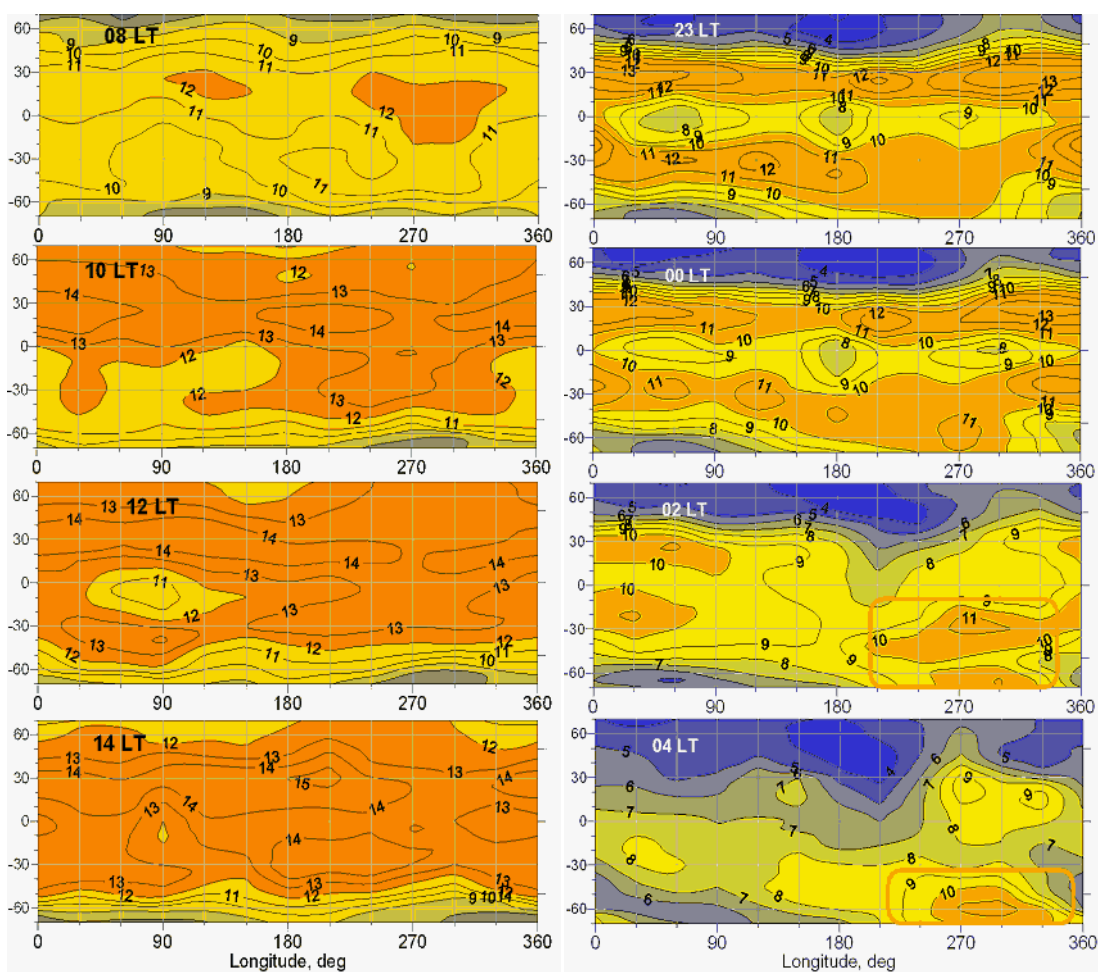
Запущенный еще в 1979 г. спутник Интеркосмос-19 со станцией внешнего зондирования ионосферы позволял обеспечивать непрерывный (через каждые 64 секунды) режим работы этой станции с запоминанием в течение примерно 16 ч, что составляло примерно 10 витков или 250 градусов по долготе. Эти данные внешнего зондирования ионосферы до сих пор остаются уникальными. По ним получено и еще будут получаться новые знания о глобальном распределении электронной концентрации во всей толще внешней ионосферы. Целью данной работы было построение эмпирической модели экваториальной аномалии в критической частоте F2-слоя по этим данным.

Закончено построение эмпирической модели экваториальной аномалии (ЭА) по данным Интеркосмос-19 для высокой солнечной активности. Для этого было построено глобальное распределение foF2 в экваториальной ионосфере для каждого часа местного времени (LT) для летних, зимних и равноденственных условий. Это позволяет впервые в полном объеме изучить динамику ЭА с течением местного времени для всех сезонов. Некоторые свойства этой динамики при высокой солнечной активности:

1. ЭА начинает проявляться в 08 LT. При этом в летних условиях сначала образуется зимний (южный) гребень экваториальной аномалии, а в зимних условиях соответственно зимний (северный) гребень. Второй, слабо выраженный гребень ЭА летом и зимой появляется только в 11 LT. В дневных и зимних условиях ЭА окончательно, с обоими гребнями на всех долготах, формируется к полудню, но летний гребень по-прежнему меньше, чем зимний. И только в 14 LT ЭА достигает максимального развития с одинаково хорошо выраженными гребнями. В равноденствие также наблюдается асимметрия – сначала формируется южный гребень аномалии, однако к 14 LT ЭА становится строго симметричной.

2. Ярко выраженная ЭА наблюдается вплоть до 23 LT. Распад ЭА начинается около полночи, и уже к 02 LT летом остается только северный гребень, а зимой южный гребень, слабо развитые. При этом зимой в южном полушарии на долготах Америки наблюдается двойной максимум foF2: низкоширотный относится к гребню экваториальной аномалии, а высокоширотный – к так называемой аномалии моря Уэдделя (WSA – Weddell Sea Anomaly). Поэтому динамика экваториальной ионосферы в этой области имеет сложный характер и при анализе вариаций ионосферы часто приводит к ошибочным выводам, как видно из анализа литературы. ЭА перестает существовать к 03-04 LT, хотя в отдельные

дни слабо развитые гребни ЭА могут наблюдаться на отдельных долготах даже в 05 LT. ЭА практически никогда не наблюдается в период с 05 LT с 07 LT. В это же время отсутствует и дополнительный экваториальный слой F3.



Развитие (слева) и распад (справа) экваториальной аномалии с течением местного времени в период летнего солнцестояния. Изолинии foF2 представлены в МГц. Красным квадратом отмечено наличие двойного максимума в 02 LT и максимума, связанного с аномалией моря Уэдделла в 04 LT.

**Руководитель темы:** Карпачев А.Т., д.ф.-м.н., ИЗМИРАН, karp@izmiran.ru

**Состав группы:** Карпачев А.Т., Клименко В.В., Клименко М.В., Кулешова В.П., Миронова Т.Е.

**Публикации:**

1. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., Ratovsky K.G., Stepanov A.E. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar

activity periods: Interkosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation // *Advances in Space Research*, V. 55, N 8, P. 2020–2032. 2015.

2. Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Telegin V.A. Equatorial anomaly characteristics and dynamics during high solar activity according to the Interkosmos-19 topside sounding data / 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Prague, June 2015. (Solicited).

### **Тема 7.2.2. Модельно-информационное обеспечение ионосферных проектов.**

**Аннотация.** Получено, что сдвиг во времени (запаздывание) ионосферных процессов по сравнению с их источниками в межпланетной среде и магнитосфере Земли позволяет при появлении признаков начала бури в параметрах ММП и солнечного ветра и наземном мониторинге геомагнитных и ионосферных параметров прогнозировать развитие рассмотренных процессов в течение 48 ч после начала бури.

Проведен анализ глобального отклика ионосферы на возмущения межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ). Составлен каталог 67 геомагнитно-ионосферных бурь на основе АЕ-индекса авроральной электроструи и его модификации АЕs с помощью скользящей медианы с окном в 7ч [1-2], бурь Dst индекса и бурь полного электронного содержания (ТЕС) по глобальным картам GIM-ТЕС за 1999-2015гг. Начало бури определено по пороговым значениям параметров ММП ( $B$ ,  $dB/dt$ ,  $B_z$ ) и максимальному значению индекса авроральной электроструи  $AEs \geq 900$  нТл. Пороговые значения межпланетных параметров начала бури: (1) IMF  $B$  возрастает за 3ч на  $\Delta B \geq 3$  нТл (свыше 1500 событий за рассмотренный период); (2)  $dB/dt \geq 3$  нТл/ч (совпадение этого условия с порогом (1) наблюдалось для 750 событий); (3)  $B_z < 0$  (совпадение всех 3х условий сократило список бурь ММП до 450). Для идентификации геомагнитно-ионосферных бурь по пороговым значениям амплитуды соответствующих ионосферных и геомагнитных индексов составлены каталоги, представленные на сайте ИЗМИРАН <http://www.izmiran.ru/services/iweather/storm/>: (4) планетарный ионосферный индекс  $W_p \geq 5.0$  для бурь полного электронного содержания ТЕС (таких ионосферно-плазмосферных бурь наблюдалось свыше 300, ссылки на методику составления каталога в работах [1-3]); (5)  $Dst \leq -100$  нТл (бурь Dst наблюдалось свыше 350 за указанный период); (6)  $AE \geq 1000$  нТл (таких бурь наблюдалось менее 100, в то время как по условию  $AE \geq 500$  нТл наблюдалось около 2000 бурь и суббурь), (7)  $AEs \geq 900$  нТл (таких бурь наблюдалось более 90). Оказалось, что совокупность критериев (1-3) является

необходимым, но не достаточным условием для возникновения геомагнитно-ионосферной бури. В частности, инициация бурь (4-7) возмущениями ММП (1-3) наблюдалась для 67 из рассмотренных бурь. В результате проведенного анализа показано, что сдвиг во времени (запаздывание) ионосферных процессов по сравнению с их источниками в межпланетной среде и магнитосфере Земли позволяет при появлении признаков начала бури в параметрах ММП и солнечного ветра и наземном мониторинге геомагнитных и ионосферных параметров прогнозировать развитие рассмотренных ионосферных процессов в течение 48 ч после начала бури [1].

Выполнен статистический анализ наибольшей вероятности появления признаков ионосферных бурь ТЕС в зависимости от региона, как во время ионосферных бурь, так и при так называемых «спокойных условиях» [3]. На Рис. 1 показаны области повышенной ионосферной возмущенности, исследованные по глобальным картам ионосферного W-индекса на основе карт полного электронного содержания ТЕС за период 1999-2014 гг. В каталоге ИЗМИРАН за этот период указаны 270 планетарных ионосферных бурь, что составляет 8% времени за 16 лет, и остальные 92% относятся к «спокойным условиям». Плотность появления индексов бури оценивалась в 240 суб-регионах, равномерно расположенных на глобусе с шагом 15 град по долготе (1 часовой пояс) и полосах широт 10 град в приполюсных зонах и 20 град на средних, низких и экваториальных широтах. Показана зависимость положительных ионосферных бурь (повышенная плотность электронов,  $pW^+$ ) и отрицательных ионосферных бурь (пониженная плотность электронов,  $pW^-$ ) от регионов на Земле, сезона и уровня солнечной активности (СА). Вероятность  $pW^+$  в 2 раза превосходит  $pW^-$  при высокой и умеренной СА, но в минимуме СА  $pW^+$  в 1.2 раза больше, чем  $pW^-$ . Зоны доминирующих положительных бурь ( $pW^+ \approx 10\%$ ) обнаружены в Южной Америке (вблизи Бразильской геомагнитной аномалии), на севере Европы и России, и на долготах от  $30^\circ W$  до  $30^\circ E$  в Антарктике. Отрицательные бури доминируют ( $pW^- \approx 22\%$ ) в Антарктике. Вероятности  $pW^+$  и  $pW^-$  показывают зимний максимум  $pW^+$  и летний максимум  $pW^-$ , убывая от высоких широт к минимуму на экваторе во все сезоны в обоих полушариях. Плотность  $pW^+$  и  $pW^-$  достигает 20-25% во время ионосферных бурь, однако и в «спокойных условиях» остаточная возмущенность достигает 6% в высоких широтах, доминирующая в Антарктике, что свидетельствует о регулярной неустойчивости ионосферной плазмы на открытых магнитных силовых линиях, наблюдавшейся в течение полутора циклов солнечной активности.



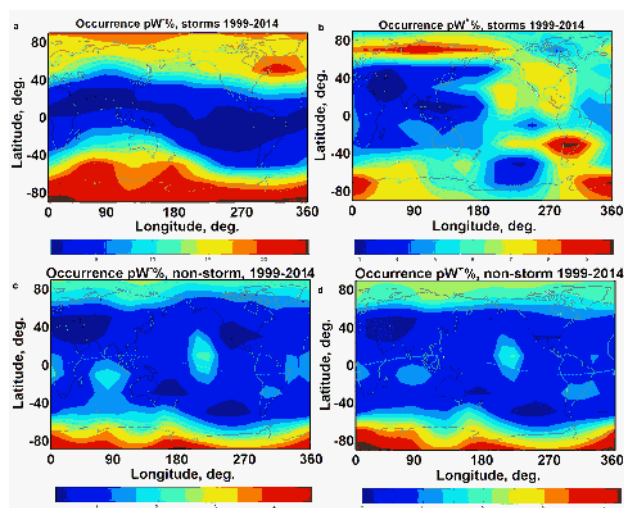


Рис. 1. Глобальное распределение ионосферных бурь в процентах за период 1999-2014 гг: а) регионы отрицательных ионосферных бурь по каталогу бурь ТЕС ( $pW^-$ ), б) регионы положительных ионосферных бурь по каталогу бурь ТЕС ( $pW^+$ ), в) отрицательные возмущения ТЕС при «спокойной» ионосфере ( $pW^-$ ), г) положительные возмущения ТЕС при «спокойной» ионосфере ( $pW^+$ ).

**Руководитель темы:** Гуляева Т.Л., к.ф.-м.н., ИЗМИРАН, gulyaeva@izmiran.ru

**Состав группы:** Гуляева Т.Л., Пустовалова Л.В.

#### Публикации:

1. Гуляева Т.Л. Анализ геомагнитно-ионосферных бурь, инициированных возмущениями ММП и параметров солнечного ветра. Солнечная и солнечно-земная физика – 2015. Труды ГАО РАН, 103-106, [http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf\\_2015/conf\\_2015.pdf](http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf_2015/conf_2015.pdf), 2015.
2. Yenen, S.D., Gulyaeva, T.L., Arıkan, F., Arıkan, O. Association of ionospheric storms and substorms of Global Electron Content with proxy AE index. *Adv. Space Res.*, 56(7), 1343-1353, doi:/10.1016/j.asr.2015.06.025, 2015.
3. Gulyaeva T.L., Arıkan F., Stanislawski I., Poustovalova L.V. Global distribution of zones of enhanced risk for the ionospheric weather. *J. Geography, Earth, Environ. Int.*, 4(1), 1-13, DOI:10.9734/JGEEI/2016/20488, <http://sciencedomain.org/issue/1438>, 2016.

### **Проект 7.3. Пространственная структура и динамика проявления флуктуаций ГЛОНАСС/GPS сигналов в Арктике и их влияние на точность позиционирования.**

#### **Тема 7.3.1. Пространственная структура и динамика проявления флуктуаций ГЛОНАСС/GPS сигналов в Арктике и их влияние на точность позиционирования.**

**Аннотация.** Получено, что отечественная навигационная система ГЛОНАСС эффективна для исследования высокоширотной ионосферы.

Одним из индикаторов состояния космической погоды являются флуктуации и сцинтилляции трансionoсферных сигналов в высокоширотной ионосфере. Флуктуации и сцинтилляции сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS обусловлены с эффектами рефракции и дифракции сигналов на ионосферных неоднородностях. В высокоширотной ионосфере присутствуют как мелкомасштабные, так и крупномасштабные неоднородности. Флуктуации и сцинтилляции могут вызывать нарушение фазового синхронизма за счёт скачков фазы когерентных сигналов L1/L2, что приводит к срывам приема сигналов. В конечном итоге это влияет не только на точность, но и возможность местоопределения. Особенно это касается навигации в Арктике в периоды геомагнитных возмущений.

В рамках темы был проведён анализ использования для мониторинга ионосферы отечественной космической навигационной системе ГЛОНАСС. Показано что, ГЛОНАСС более эффективна для исследования высокоширотной ионосферы. Была разработана методика получения данных о вариациях полного электронного содержания ионосферы (TEC) по двухчастотным измерениям задержек ГЛОНАСС сигналов. Были проведены дополнительные исследования по проявлению флуктуаций навигационных сигналов и их связи с авроральной активностью во время геомагнитного возмущения 2 октября 2013 г.

В качестве исходных данных использовались регулярные ГЛОНАСС/ GPS наблюдения международной сети IGS. Стандартные наблюдения, доступные в сети интернет, представлены с интервалом измерений 30 секунд. Такие достаточно медленные измерения позволяют получать данные по флуктуациям обусловленных рефракцией сигналов на неоднородностях размерами более километра и соответственно описывать их как TEC флуктуации на трассе спутник-приёмник. В анализе использовалась разработанная в КФ ИЗМИРАН методика обработки наблюдений, которая позволяет по исходным измерениям, представленным в RINEX формате, выявить флуктуации спутниковых сигналов и оценить их интенсивность в пространстве и времени

Рассматриваемое возмущение характеризовалось тем, что ТЕС флуктуации были зарегистрированы даже на среднеширотной станции Калининград. На рисунке 1 представлено временно развитие ТЕС флуктуаций (параметр ROT ) на среднеширотной и высокоширотной станциях Калининград и Кируна для спокойного (1 октября) и возмущенного (2 октября) дней для всех пролётов спутников на 24 часовом периоде.

Для спокойного дня флуктуации ТЕС на средних широтах фактически не наблюдались. Во время возмущения на фоне общей низкой флуктуационной активности ярко проявляется вспышка усиления флуктуаций для спутника № 14 в интервале 05-06 UT.

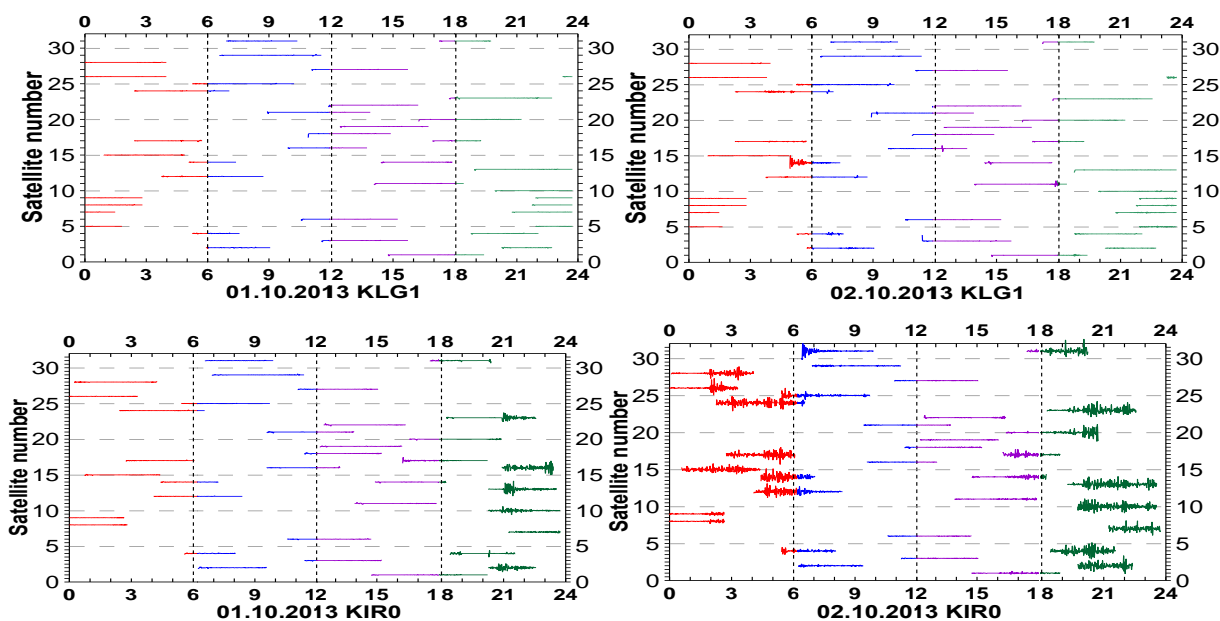


Рис. 1. Развитие ТЕС флуктуаций над среднеширотной и высокоширотными станциями Калининград и Кируна для спокойного и возмущённого периода.

На высоких широтах в спокойных условиях интенсивные флуктуации регистрировались в вечернее время. Во время возмущения интенсивные флуктуации дополнительно наблюдались в утренние часы. Было выявлено что, ТЕС флуктуационная активность по времени совпадает с авроральным возмущением, которое регистрировалось на сети станций IMAGE (<ftp://space.fmi.fi/image>). Проявление флуктуаций навигационных сигналов на станции Калининград свидетельствуют что, во время геомагнитного возмущения авроральный овал сместился к экватору. Был проведён анализ долгого проявления ТЕС флуктуаций по станциям -TIXI (71.4°N, 128.0°E), KIRO (67.5N°, 21.0°E) и AV18 (66°.7N 162.0°W) расположенных приблизительно на одной широте. Во время возмущения интенсивность флуктуаций существенно увеличилась на всех станциях. Максимальная интенсивность флуктуаций на всех станциях наблюдалась в одно и тоже мировое время (UT эффект).

**Руководитель темы:** Шагимуратов И.И., к.ф.-м.н., Калининградский филиал ИЗМИРАН, shagimuratov@mail.ru

**Состав группы:** Ефишов И.И., Тепеницина, Черноус С.А., Якимова Г.А., Шагимуратов И.И.

**Публикации:**

1. Шагимуратов И. И., Черняк Ю. В., Захаренкова И. Е., Н.Тепеницына Н. Ю., Радиевский А. В., Ефишов И. И., Якимова Г. А., Использование навигационной системы ГЛОНАСС для ионосферных исследований // Химическая физика. 2015. Т. 34. №10. С. 25-32.
2. Shagimuratov I., Chernouss S., Efishov I., Cherniak I., Zakharenkova I., Tepenitsyna N. Development of the GPS TEC fluctuations at the high latitude ionosphere during geomagnetic storm // Proceedings of Seventh Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere” Sunny Beach, Bulgaria, 1-5 June 2015, p.99-103
3. Shagimuratov I., Chernous S., Cherniak I., Zakharenkova I., Efishov I., Phase fluctuations of GPS signals associated with aurora // Proceedings of the 9th European conference on antennas and propagation, Lisbon, 12-17 April 2015, paper №1570053943.
4. Черноус С. А., Швец М. В., Филатов М. В., Шагимуратов И. И., Калитенков Н.В., Исследование особенностей навигационных сигналов в период авроральных возмущений // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 10.

**Тема 7.3.2. Источники электромагнитного дрейфа ионосферной плазмы, его реакция на внутренние процессы и внешние воздействия, и влияние на распределение околоземной космической плазмы**

**Аннотация.** Обосновано, что долготная зависимость отклика низкоширотной ионосферы на геомагнитные суббури связана с зависимостью этого отклика от момента начала суббури, поскольку параметры системы термосфера-ионосфера зависят от долготы и местного времени.

С помощью Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) были проведены исследования ионосферных эффектов четырех полностью идентичных модельных суббурь с различными моментами начала в 00:00 UT, UT 6:00, 12:00 UT, 18:00 UT для весенних равноденственных условий минимума солнечной активности. Такое исследование дало возможность изучить долготную зависимость отклика ионосферы на геомагнитные суббури. Показано, что: (1) воздействие на экваториальную аномалию, и экваториальный электроджет сильно зависит

от момента начала суббури; (2) возмущения в экваториальной плотности зонального тока во время суббури имеет значительную долготную зависимость; (3) наблюдаемые противоречия в отклике электрического поля в различных регионах на суббури могут быть связаны с зависимостью этого отклика от момента начала суббури, т.е. с долготной изменчивостью параметров системы термосфера-ионосфера.

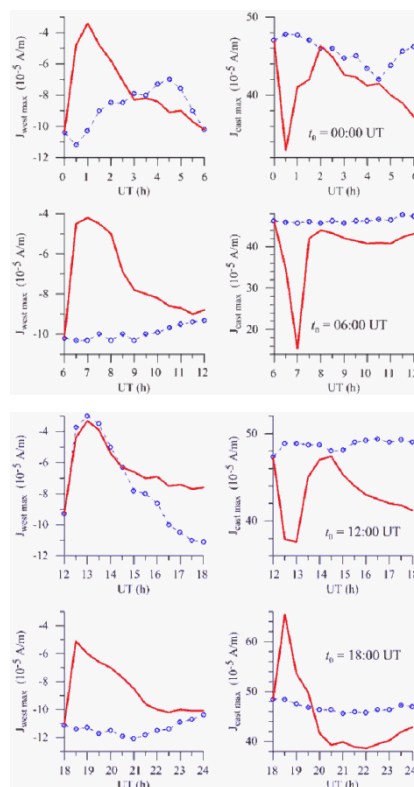


Рис. 1. Зависимость западных (слева) и восточных (справа) экваториальных токов от времени начала геомагнитной суббури. Синими кружками показаны токи в спокойных условиях, красными линиями – во время суббури.

Показано, что, несмотря на наличие солнечной ионизации над областями WSA и YA в дневное время и ее отсутствие в ночное время, значения foF2 в ночное время больше, чем днем из-за: (1) горизонтального переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа; (2) вертикальной составляющей переноса плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля, под действием меридиональной компоненты термосферного ветра; (3) распределения нейтрального состава термосферы.

**Руководитель темы:** Клименко М.Ф., к.ф.-м.н., Калининградский филиал ИЗМИРАН, maksim.klimenko@mail.ru

**Состав группы:** Клименко М.В., Клименко В.В.

## Публикации:

1. Klimenko V.V., Klimenko M.V. EEJ and EIA variations during modeling substorms with different onset moments // *Advances in Space Research*, 2015, doi:10.1016/j.asr.2015.07.041.
2. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., Ratovsky K.G., Stepanov A.E. Spatial features of Weddell Sea and Yakutsk Anomalies in foF2 diurnal variations during high solar activity periods: Interkosmos-19 satellite and ground-based ionosonde observations, IRI reproduction and GSM TIP model simulation // *Advances in Space Research*, 2015, V. 55 (8), P. 2020-2032, doi:10.1016/j.asr.2014.12.032.

### Тема 7.3.3. Влияние процессов в стратосфере и мезосфере на глобальное распределение ионосферных параметров.

**Аннотация.** Обосновано, что изменения зонального электрического поля являются ключевым механизмом отклика ионосферы низких широт на внезапные стратосферные потепления.

Исследована роль изменчивости средней атмосферы в вариациях электрических полей в ионосфере Земли и вызываемые ими ионосферные эффекты. При задании дополнительного электрического потенциала в модели GSM TIP удалось воспроизвести наблюдаемые возмущения полного электронного содержания во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Исследования ионосферных эффектов внезапных стратосферных потеплений с использованием моделей TIME-GCM и Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (GSM TIP) доказывают, что изменения зонального электрического поля (вертикального дрейфа плазмы) являются ключевым механизмом отклика ионосферы на низких широтах (рис. 1)

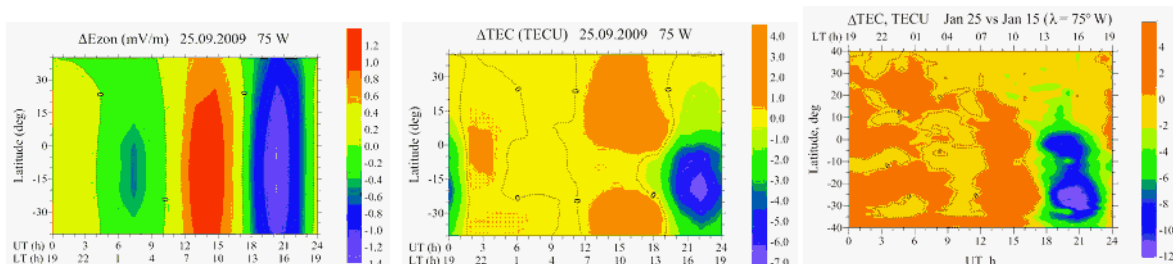


Рис. 1 Рассчитанные в модели GSM TIP суточные вариации возмущений зонального электрического поля (слева) и ТЕС (справа) на различных широтах на долготе 75°W для 25 января. Справа показаны данные GPS ТЕС наблюдений.

Однако остается открытым вопрос о механизмах генерации таких зональных электрических полей на низких широтах во время внезапных стратосферных потеплений.

**Руководитель темы:** Кореньков Ю.Н., д.ф.-м.н., Калининградский филиал ИЗМИРАН, office@wdizmiran.ru

**Состав группы:** Бессараб Ф.С., Клименко В.В., Клименко М.В., Кореньков Ю.Н.

**Публикация:**

1. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Bessarab F. S., Korenkov Yu. N., Liu H., Goncharenko L. P., Tolstikov M. V. Study of the thermospheric and ionospheric response to the 2009 sudden stratospheric warming using TIME-GCM and GSM TIP models – first results // J. Geophys. Res. Space Physics, 2015, V. 120, doi:10.1002/2014JA020861.

**Тема 7.3.4. Ионосферные неоднородности, возбуждаемые инфразвуковыми источниками в атмосфере**

**Аннотация.** На основе численных экспериментов предсказано, что в верхней атмосфере в области волноводного распространения инфразвуковых волн могут формироваться практически не распространяющиеся локализованные возмущения.

К числу явлений, не получивших до настоящего времени надежной физической интерпретации, относятся возмущения ионосферы, связанные с развитием метеорологических возмущений в нижней атмосфере, ионосферные эффекты, обусловленные сейсмической активностью. Объяснение этих явлений базируется, в основном, на механизмах генерации и распространения акустико-гравитационных волн (АГВ). Развиваемые на основе АГВ подходы испытывают ряд трудностей в объяснении таких важных морфологических особенностей наблюдаемых явлений как малые времена задержки отклика ионосферы и пространственная локализация возникающих неоднородностей. В 2015 г. в ходе работ по экспериментальному и теоретическому исследованию процессов распространения АГВ в атмосфере решались следующие задачи:

1. Проведение наблюдений вариаций параметров нижней атмосферы с целью выделения волновых вариаций с периодами инфразвуковых волн и короткомасштабных ВГВ. Основное внимание уделено организации и проведению наблюдений в тропосфере и ионосфере в период солнечного затмения в Калининграде 19.03.2015 г.
2. Проведение численных экспериментов по изучению процесса распространения АГВ от источников волн, включая подвижные источники, имитирующих процессы, развивающиеся при прохождении метеорологических фронтов и солнечного терминатора. Выполнены численные эксперименты с целью изучения механизмов формирования неоднородностей верхней атмосферы от подвижных источников инфразвуковых волн на

поверхности Земли. Результаты расчетов показали, что в верхней атмосфере, в области волноводного распространения инфразвуковых волн могут формироваться практически не распространяющиеся локализованные возмущения (рис. 1). Предполагается, что возникновение таких неоднородностей обусловлено интерференцией инфразвуковых волн в области волноводного распространения.

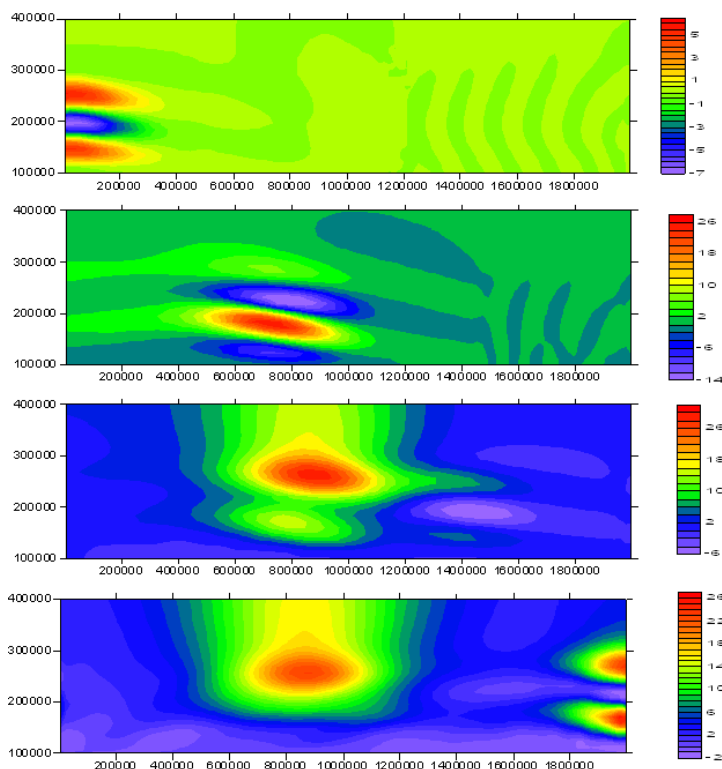


Рис. 1. Пространственное распределение волновых возмущений температуры, создаваемые источником АГВ на поверхности Земли, движущимся со скоростью 300 м/с. Через 15 мин, 30 мин, 1 час и 2 часа после начала движения источника АГВ. Ось  $x$  – горизонтальная координата (м), ось  $Y$  – высота (м).

**Руководитель темы:** Карпов И.В., д.ф.-м.н., Калининградский филиал ИЗМИРАН, ivkarpov@inbox.ru

**Состав группы:** Борчевкина О.П., Карпов И.В., Радиевский А.В., Кшевецкий С.П., Карпов А.И., Бессараб Ф.С.

**Публикации:**

1. Карпов И.В., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П., Радиевский А.В., Карпов А.И. Возмущения верхней атмосферы и ионосферы, инициированные источниками АГВ в нижней атмосфере// Химическая физика, 2016, № 1 (принята к печати).



2. Карпов И.В., Кшевецкий С.П. Нагрев верхней атмосферы АГВ, от локального наземного источника, и его влияние на режим распространения волн// Физика атмосферы и океана (отправлено в печать).

**Проект 7.4. Экспериментальное исследование реакции полярной ионосферы на вторжения энергичных частиц магнитосферного происхождения с помощью трехкомпонентной установки для измерения ОНЧ излучений. Исследование экстремальных проявлений солнечной активности по данным наземной сети нейтронных мониторов**

**Тема 7.4.1. Исследование экстремальных проявлений солнечной активности по данным наземной сети нейтронных мониторов**

**Аннотация.** По данным нейтронных мониторов Апатиты и Баренцбург получено, что в 2015 году был достигнут минимум потока космических лучей.

24-й солнечный цикл очень беден на события GLE, т.е. наземные возрастания космических лучей. С начала цикла в 2009 г их аномально мало. В 2012 г. зарегистрировано одно событие. К примеру, в 18-23 циклах произошло более шести десятков событий GLE. Поэтому с точки зрения наблюдений солнечных космических лучей на нейтронных мониторах экстремальных событий не произошло.

В 2015 г. регистрация космических лучей выполнялась на двух станциях: Апатиты и Баренцбург (Шпицберген). В режиме реального времени данные НМ Апатиты представлялись в сеть Интернет. Данные станции НМ Баренцбург доступны по специальному запросу. В 2015 году на мониторах Апатиты и Баренцбург зарегистрирован минимум потока космических лучей. Это означает, что был достигнут максимум солнечной активности. Следовательно, 24-й цикл прошел максимум, и активность Солнца пошла на спад, а 24-й цикл – к завершению. Данные, полученные другими методами, подтверждают это. 24-й цикл солнечной активности был необычен с самого начала. И в 2015 г. аномальность эта сохранилась. За время 24-го цикла (с 2009 г.) произошло лишь одно небольшое GLE 17.05.12, и с тех пор больше ничего. Несколько раз случались мощные СПС (солнечные протонные события), однако, их энергия не превышала 100-200 МэВ и, соответственно, на уровне земли зарегистрированы они не были. Самое свежее подобное событие – 29.10.15. Высокогорные южнополярные станции (Южный Полюс, Восток, Терре Адели) отметили якобы возрастание в 1-2 %, что не превышает трех "сигм",

а будучи редуцированным к уровню моря (от уровня 2800 м), такие возрастания еще в 2-3 раза станут меньше.

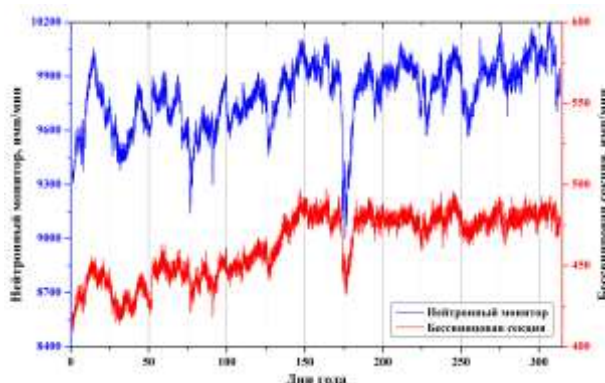


Рис. 1. Темп счета нейтронных мониторов в Апатитах (стандартный нейтронный монитор и бессвинцовая секция) в 2015 году. Часовое усреднение.

**Руководитель темы:** Балабин Ю.В., к.ф.-м.н., ПГИ КНЦ РАН, balabin@pgia.ru

**Состав группы:** Балабин Ю.В., Германенко А.В., Вашенюк Э.В.

#### **Публикации:**

1. Логачёв Ю.И., Г. А. Базилевская, Э. В. Вашенюк, Е. И. Дайбог, В. Н. Ишков, Л. Л. Лазутин, Л. И. Мирошниченко, И. Е. Петренко, А. Г. Ступишин, Г. М. Сулова, О. С. Яковчук. Сравнение протонной активности в 20–23-м солнечных циклах // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 3. С. 291-301.
2. Балабин Ю.В., А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский, Э.В. Вашенюк. Анализ события GLE72 (6 января 2014 г.) // Изв. РАН, Серия физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 612.

#### **Тема 7.4.2. Экспериментальное исследование экстремальных проявлений солнечной активности в нижней ионосфере по данным наземной сети трёхкомпонентных установок для измерения СНЧ/ОНЧ излучений.**

**Аннотация.** На основе экспериментального исследования экстремальных проявлений солнечной активности в нижней ионосфере обнаружен случай аномального повышения скоростей распространения атмосфериков в возмущенное время вместо ожидаемого понижения, что требует специального рассмотрения.

Для экспериментального исследования экстремальных проявлений солнечной активности в нижней ионосфере использована скорость распространения атмосфериков в СНЧ диапазоне в авроральной области, получаемая с помощью трёхкомпонентных

регистраторов в обс. Ловозеро и обс. Баренцбург. Для этого было проанализировано два события. Первое событие относится к ноябрю-декабрю 2011 г. Второе событие связано с солнечной вспышкой, произошедшей 22 октября 2011 г. (рис. 1).

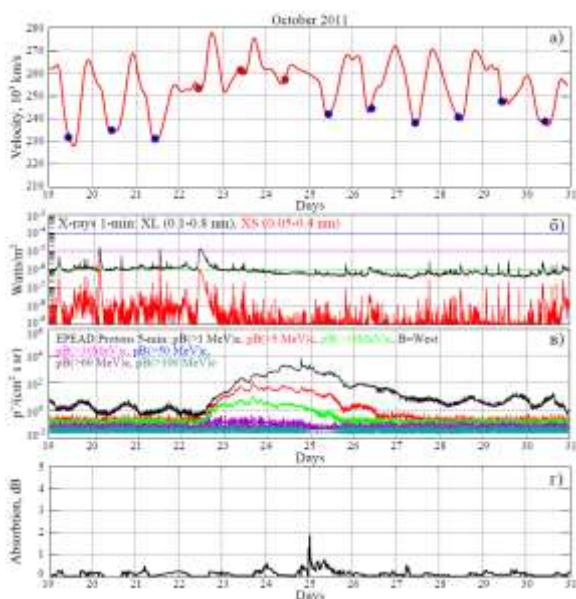


Рис. 1. (а) Скорость распространения атмосфериков на трассе Ловозеро-Баренцбург; (б) поток рентгеновских лучей; (в) поток протонов; (г) риометрическое поглощение (обс. Ивало).

С 22 по 24 октября наблюдался небольшой поток высокоэнергичных протонов. Для протонов с энергиями больше 10 МэВ он составил около  $10 \text{ p}^+ \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ . Поток рентгеновских лучей 22 октября достигал значения  $10^{-5} \text{ Вт/м}^2$ . Данный случай отличался от предыдущего аномальным поведением скорости распространения ЭМ возмущений на трассе Ловозеро-Баренцбург во время гелиогеофизического возмущения. Так, после спокойного промежутка времени, когда скорость днем составляла примерно 230 тыс. км/с, а ночью – примерно 265 тыс. км/с, во время вторжения высокоэнергичных протонов мы наблюдали днем не ожидаемое понижение скорости, а ее увеличение примерно на 20 тыс. км/с. Ночные значения скорости также немного увеличились и стали достигать значений около 278 тыс. км/с. Этот факт не может быть объяснен в рамках сферически-слоистой модели, однако то, что значения скоростей распространения во время вспышки соответствуют средним значениям скорости для ночи дает возможность предположить, что условия распространения в волноводе Земля-ионосфера в данном случае соответствуют ночным. После 25 октября скорости вернулись к исходным значениям. Суточный ход скорости распространения ЭМ возмущений также восстановился.

В целом, экспериментальное исследование экстремальных проявлений солнечной активности в нижней ионосфере показало, что в возмущенных гелиогеофизических условиях среднесуточная скорость распространения атмосфериков, как правило, снижается относительно невозмущенных условий. Этот факт может быть объяснен уменьшением действующей высоты волновода вследствие изменения профиля проводимости ионосферы. Обнаружен случай аномального повышения скоростей распространения атмосфериков в возмущенное время вместо ожидаемого понижения, что требует специального рассмотрения.

**Руководитель темы:** Федоренко Ю.В., к.ф.-м.н., ПГИ КНЦ РАН,  
yury.fedorenko@gmail.com

**Состав группы:** Ларченко А.В., Лебедь О.М., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В.

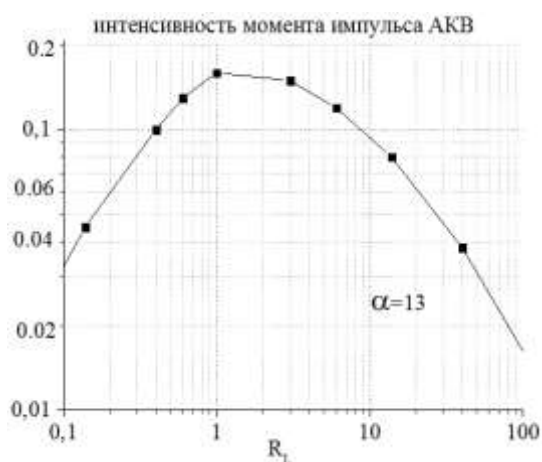
**Публикации:**

1. Ларченко А.В., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. Трехкомпонентные измерения структуры электромагнитного поля в диапазоне крайне низких и сверхнизких частот // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 8. С. 793-801.
2. Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Ларченко А.В., Пильгаев С.В. Реакция авроральной нижней ионосферы на солнечные вспышки в марте 2012 г. по данным наблюдений в СНЧ диапазоне // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55. № 6. С. 797–807.

**Проект «Критерии объединения волн, создаваемых пульсирующей плазмой в ионосфере Земли» (проект СО РАН).**

**Аннотация.** Цель проекта – поиск критериев эффективного возбуждения квазистационарных волн (КВ) в узкой силовой трубке (гео)магнитного поля с использованием пульсирующей плазмы (далее – источник). КВ формируются в результате действия механизма объединения волн и источника взрывного характера природного или искусственного происхождения.

Методы исследования – расчеты кластерах и эксперименты на стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН. Впервые показано, что источник эффективно создает трубчатые, совмещенные в пространстве КВ-альфеновскую и медленную магнитозвуковую при выполнении критериев проявления механизма объединения волн [1]. Определен допустимый диапазон отклонения от “резонанса” одного из критериев, который наиболее сильно зависит от энергии вспышек.



На рисунке показан момент импульса  $P_Z$  альфвеновской волны в зависимости от отношения ларморовского радиуса ионов плазмы к динамическому радиусу вспышек. Расчет проведен при оптимальных значениях других критериев [1]. Как видно,  $P_Z$  слабо изменяется в области  $\Delta R_L \sim 0.5 \div 5$ . Зависимость границ соответствующего диапазона энергии вспышек имеет вид  $\Delta Q \sim 1/\Delta R_L^3$ .

Таким образом, при одновременном формировании трубчатых квазистационарных альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн допустимо отклонение энергий источника от оптимального значения  $Q_0$  в  $\Delta Q \approx \pm 100 \cdot Q_0$  раз, что имеет существенное фундаментальное и прикладное значение.

Направление перспективное – КВ практически без затухания переносят энергию, импульс и момент импульса вдоль силовой трубки магнитного поля. Актуальны эксперименты на стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН и численное моделирование с учетом градиентов магнитного поля.

**Руководитель проекта:** г.н.с., д.ф.-м.н. В.Н. Тищенко, Институт лазерной физики СО РАН.

#### **Публикация:**

1. В.Н. Тищенко, И.Ф. Шайхисламов, А.Г. Березуцкий. Механизм объединения волн в космической плазме с магнитным полем: транспортировка импульса и момента импульса. Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности: Альманах / Под редакцией В.А. Садовниченко, Г.И. Савина, Вл.В. Воеводина. М.: Издательство МГУ, 2015, с. 65 - 74.