

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.024

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОНЧ ДИАПАЗОНА В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ШИРОТ ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ GLE 70

О.И. Ахметов<sup>1</sup>, И.В. Мингалев<sup>1</sup>, О.В. Мингалев<sup>1,2</sup>, В.Б. Белаховский<sup>1</sup>,  
З.В. Суворова<sup>1</sup>, Е.А. Маурчев<sup>1</sup>, Ю.В. Балабин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская область), Россия

<sup>2</sup>Мурманский арктический государственный университет, г. Апатиты (Мурманская область), Россия

**Ключевые слова:** распространение ОНЧ волн, численное моделирование, ионосфера, GLE

### Аннотация

В работе представлено исследование влияния события GLE 70 (ground level enhancement) 13 декабря 2006 на распространение радиосигналов ОНЧ диапазона в высоких широтах. Методами вычислительного эксперимента на основе численной модели распространения электромагнитных волн, разработанной в Полярном геофизическом институте, исследованы амплитудные и фазовые характеристики сигналов системы RSDN-20. Профили концентрации электронов для исследуемого события получены с использованием модели RUSCOSMICS, созданной в ПГИ, и модели ионосферы GDMI (Global Dynamic Model of Ionosphere), являющейся ответвлением модели IRI и разрабатываемой сотрудниками ИЗМИРАН. Геомагнитное поле задавалось при помощи международной модели геомагнитного поля Земли IGRF 13-ой генерации. В результате обработки данных вычислительных экспериментов показано, что в условиях события GLE 70 наблюдаются значительные амплитудные искажения сигналов на частотах системы RSDN-20. Существует частотная зависимость влияния высыпаний высокоэнергетических протонов на амплитуду сигналов РСДН-20. Сигналы меньшей частоты реагируют на такие события сильнее. Фазы сигналов РСДН-20 менее, чем амплитуды подвержены влиянию GLE, однако также испытывают значительные искажения. Задержка сигнала в некоторые моменты увеличивалась в несколько раз.

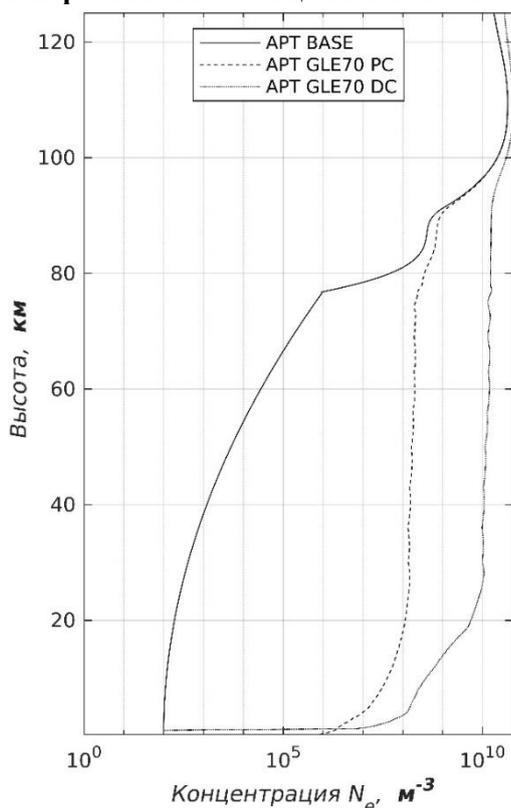
### 1. Введение

В области высоких широт возможно спорадическое появление высокопроводящего слоя на высоте, значительно меньшей высоты D-слоя ионосферы. Такое изменение профиля электронной концентрации оказывает значительное влияние на распространение электромагнитных волн в волноводе Земля-ионосфера. Изучение распространения ОНЧ-волн в таких условиях необходимо, поскольку ОНЧ-волны применяются для навигации. С другой стороны, ОНЧ-волны, распространяющиеся в волноводе Земля-ионосфера, применяются для контроля состояния ионосферы вдоль пути их распространения в волноводе [Bashkuev et al., 2018; Стародубцев и др., 2019], поскольку их амплитуды и фазы очень чувствительны к электропроводности верхних границ волновода. Связать конкретные виды профилей электронной концентрации с амплитудными и фазовыми изменениями возможно, применяя методы вычислительного эксперимента.

Для выявления реакции сигналов системы дальней навигации РСДН-20 (11905, 12679, 14881 Гц) на значительные изменения профиля электронной концентрации во время вторжений высокоэнергетических протонов в атмосферу Земли в представленной работе рассмотрено протонное событие ground level enhancement (GLE) 70. Вычислительные эксперименты проведены на модели распространения электромагнитных волн, разработанной в ПГИ [Мингалев и др., 2018], для события GLE 70, произошедшего 13 декабря 2006 года. Выполнено три вычислительных эксперимента: в спокойных условиях, во время высыпания частиц быстрой компоненты потока солнечных протонов (prompt component - PC) и во время высыпания частиц медленной компоненты потока солнечных протонов (delayed component - DC). Потоки высыпающихся протонов разделены по их энергетическому спектру, как в работе [Маурчев и др., 2019]. Профили электронной концентрации для события были получены с использованием моделей RUSCOSMICS [Balabin et al., 2005], разработанной в PGI, и модели ионосферы Global Dynamic Model of Ionosphere (GDMI) [Шубин, 2017 и Shubin, 2015], разрабатываемой силами сотрудников ИЗМИРАН. Геомагнитное поле, необходимое для моделирования, рассчитывалось по модели International Geomagnetic Reference Field 13-й генерации (IGRF13) [Alken et al., 2021].

В результате вычислительных экспериментов получены изменения амплитуд электрической и магнитной компонент сигналов системы РСДН-20, а также скорости их распространения в условиях сильного GLE.

## 2. Модельные профили электронной концентрации, частоты столкновений электронов с нейтральными частицами и ионами



**Рисунок 1.** Профиль электронной концентрации для случая GLE 70 13 декабря 2006 года, в Апатитах в 04:00 UTC. Типом линии показаны базовый профиль, и профили компонент DC и PC.

Событие GLE 70, последнее событие 23 цикла солнечной активности, произошло 13 декабря 2006 года в 02.40 UT. Солнечное пятно 930 с координатами S06 W24 вызвало солнечную вспышку класса X3.4/2B. Вспышка сопровождалась радио всплесками типа II, IV и выбросом корональной массы типа “гало”. По данным нейтронным мониторов продолжительность события составила около 5 часов. Несмотря на то, что событие GLE 70 происходило на спаде цикла, это было достаточно мощное событие (третье по интенсивности в 23 цикле). Наибольший рост интенсивности космических лучей наблюдался на станции Оулу (92%). Тот факт, что максимум интенсивности наблюдался не на полярных станциях, говорит о том, что источник анизотропии космических лучей располагался вблизи плоскости эклиптики.

Спектр протонов космических лучей в модели RUSCOSMICS, разработанной в ПГИ, для этих случаев содержит две составляющие — быструю PC и медленную DC [Маурчев и др., 2019], различающиеся спектром энергии и разделённые по времени. Модель RUSCOSMICS даёт дополнительную скорость ионизации во время солнечных протонных событий, восстановление дополнительной электронной концентрации производилось по методике, предложенной Gledhill в работе [Gledhill, 1986].

Базовые профили электронной концентрации получены при помощи модели ионосферы GDMI. Эти профили соответствуют спокойным условиям и используются совместно с профилями модели RUSCOSMICS для моделирования возмущенной ионосферы во время GLE события. Координаты, заданные для моделей, соответствовали местоположению города Апатиты (67°34' с. ш. 33°23' в. д), а время - 04:00 UTC. Базовые профили и профили возмущенных условий представлены на рис. 1.

Частота столкновений с нейтрами и ионами  $\nu_e$

рассчитывалась на основе данных GDMI, RUSCOSMICS и данных модели NRLMSISE2000.

В представленных численных экспериментах геомагнитное поле рассчитывалось по модели IGRF13 [Alken et al., 2021].

Профиль проводимости литосферы был задан с учетом результатов исследований, полученных несколькими научными группами и опубликованных в работе [Korja et al., 2002].

## 3. Область моделирования, источник сигнала и численная схема

Численные расчеты проводились в декартовой системе координат, где ось Z располагалась нормально к поверхности Земли. Таким образом, область моделирования для численных экспериментов была параллелепипедом, включающим участок волновода Земля–ионосфера. Уровень поверхности Земли соответствовал  $Z=0$ . Область моделирования расположена на значительном расстоянии от большинства передатчиков, поэтому фронт приходящих волн можно в первом приближении считать плоским.

В численных экспериментах использовалась горизонтально однородная ионосфера и область размером 256x1000 км по горизонту, 125 км по высоте в атмосфере и ионосфере и 25 км в глубину в литосфере. Шаг сетки над поверхностью Земли – 250 м по вертикали, 500 м по горизонтали, в литосфере – 125 м по вертикали и 500 м по горизонтали. Центр источника сигнала располагался на расстоянии 64 км от трех боковых граней полученного параллелепипеда.

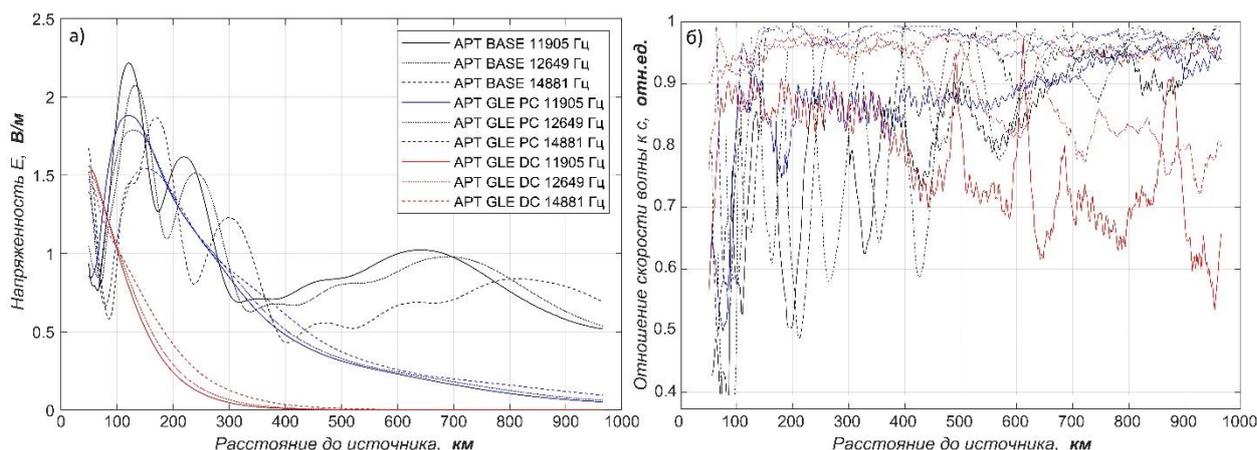
Сигнал источника представлял собой пакет синусоид на частотах системы RSDN-20 [Хафизов, 2010; Jacobsen, 2022], а именно 11905, 12679, 14881 Гц. На расстоянии 64 км от левой вертикальной границы прямоугольной области моделирования, на части вертикальной плоскости, параллельной этой границе, шириной 128 км, на высотах от поверхности Земли до 60 км было задано горизонтальное магнитное поле. Это позволило в первом приближении задать плоский фронт волны.

В представленном исследовании была использована модель распространения электромагнитных сигналов, основанная на численном интегрировании по времени системы уравнений Максвелла и уравнения для плотности тока с учетом инерции электронов в ионосфере [Мингалиев и др., 2018].

#### 4. Обсуждение результатов

В работе рассмотрены три GLE события с точки зрения распространения ОНЧ сигналов системы RSDN-20 в высокоширотном регионе. Для события GLE 70 13 декабря 2006 года проведено 3 вычислительных эксперимента: в спокойных условиях, во время высыпания частиц быстрой компоненты потока солнечных протонов и во время высыпания частиц медленной компоненты потока солнечных протонов. На рис. 2 показаны амплитуда и скорость распространения электрической компоненты сигнала РСДН-20 в зависимости от расстояния до модельного источника. Видно, что в возмущённых условиях наблюдается значительное затухание и замедление сигнала. При этом необходимо отметить ряд особенностей, а именно, зависимость от частоты сигнала и зависимость оказываемого влияния от энергетического спектра вторгающихся протонов. Частотная зависимость, очевидно, связана с глубиной проникновения сигналов разной частоты в ионосферу: так сигналы с меньшей частотой проникают в ионосферу глубже, вследствие чего влияние состояния ионосферы на них сильнее. Зависимость степени влияния от вида энергетического спектра высыпающихся протонов, вероятно, связана с более высоким потоком частиц с энергиями до  $10^3$  МэВ в случае степенного спектра DC-компоненты по сравнению с экспоненциальным спектром PC-компоненты [Маурчев и др., 2019].

Анализ сильного события GLE 70 показал значительное влияние на амплитуду и фазу сигналов РСДН-20 по сравнению со случаем спокойных условий: так затухание сигнала усилилось более чем в 5 раз на частоте 11905 Гц, а на частоте 14881 Гц в 3,5 раза. Анализ отставания от такой же волны, распространяющейся в вакууме со скоростью света, показал замедление более чем в 12 раз на частоте 11905 Гц, а на частоте 14881 Гц почти в 3 раза. Очевидно, что в условиях сильного GLE события сигналы РСДН-20 по прямому назначению не могут быть использованы.



**Рисунок 2.** Амплитуды электрической компоненты электромагнитного сигнала в зависимости от расстояния до источника. Панель а) - отношение скорости распространения электрической компоненты сигнала к скорости света в зависимости от расстояния до источника. Панель б) - типом линии показаны частоты, соответствующие частотам системы РСДН-20. Цветом линии показаны базовый профиль и профили компонент DC и PC.

Наблюдение на высокоширотных обсерваториях значительных искажений амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 могут быть хорошим индикатором вторжения высокоэнергетических частиц в ионосферу. При этом возможно разделить быструю и медленную компоненты высыпающихся протонов по разному влиянию на амплитудные и фазовые характеристики сигналов РСДН-20. Медленная компонента вносит сильные искажения как в амплитуды, так и в фазы сигналов, в то время как быстрая компонента оказывает в первую очередь влияние на амплитуды компонент сигналов РСДН-20, а фазы искажаются слабо.

#### 5. Заключение

В результате обработки данных вычислительных экспериментов получено, что в условиях GLE события наблюдаются значительные амплитудные и фазовые искажения сигналов РСДН-20. Так, во время GLE 70 обнаружено значительное влияние на амплитуду и фазу сигналов РСДН-20 по сравнению со случаем спокойных условий. Затухание сигнала усилилось более чем в 5 раз на частоте 11905 Гц, а на частоте 14881 Гц в 3,5 раза. Отставание от такой же волны, распространяющейся в вакууме со скоростью света, было более чем в 12 раз на частоте 11905 Гц, а на частоте 14881 Гц почти в 3 раза. В условия сильного GLE события

сигналы РСДН-20 не могут быть использованы для задач навигации. Наблюдение на высокоширотных обсерваториях значительных искажений амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 могут быть хорошим индикатором вторжения высокоэнергетических частиц в ионосферу.

**Благодарность.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018), <https://rscf.ru/project/18-77-10018/> (О.И. Ахметов, В.Б. Белаховский, Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин).

### Список литературы

- Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А., Гвоздевский Б.Б. Расчет скорости ионизации вещества атмосферы Земли протонами галактических и солнечных космических лучей // Солнечно-земная физика. №. 3. С. 81-88. 2019. DOI:10.12737/szf-53201908
- Мингалев И.В., Мингалев О.В., Ахметов О.И., Суворова З.В. Явная схема расщепления для уравнений Максвелла // Математическое моделирование. Т. 30. № 12. С. 17–38. 2018.
- Стародубцев С.А., Баишев Д.Г., Григорьев В.Г. и др. Анализ солнечных, космо- и геофизических событий в сентябре 2017 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН // Солнечно-земная физика. Т. 5. №. 1. С. 17-38. 2019. DOI: 10.12737/szf-51201903
- Хафизов А.В. Радионавигационные системы дальней навигации (РСДН): учебно-методическое пособие. Кировоград: Изд-во ГЛАУ. 30 с. 2010.
- Шубин В.Н. Глобальная эмпирическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы для спокойных геомагнитных условий // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 4. С. 450–462. 2017. DOI: 10.1134/S0016794019040151
- Alken P., Thébault E., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. V. 73. Art. 49. P. 1-25. 2021. DOI: 10.1186/s40623-020-01288-x
- Balabin Y.V., Vashenyuk É.V., Mingalev O.V. et al. The spectrum of solar cosmic rays: Data of observations and numerical simulation. Astron. Rep. V. 49. P. 837–846. 2005. DOI: 10.1134/1.2085253
- Bashkuev Y., Advokatov V., Buyanova D., Pushkarev M. Analysis of the conditions for the radio waves propagation in the waveguide "Earth-Ionosphere" on the paths "Novosibirsk-Ulan-Ude" and "Komsomolsk-on-Amur-Ulan-Ude" during magnetic storms August 31-September 12, 2017 // IX International Conference "Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors" (STRPEP 2018). E3S Web of Conferences, V. 62. id. 01002. 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20186201002
- Gledhill J.A., The effective recombination coefficient of electrons in the ionosphere between 50 and 150 km // Radio Science. V. 21(3). P. 399–408. 1986. DOI:10.1029/RS021i003p00399
- Jacobsen T. The Russian VLF navaid system alpha, RSDN-20. Halden. Norway. <http://www.vlf.it/alphatrand/alpha.htm>. 2022.
- Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A. et al. Crustal conductivity in Fennoscandia—a compilation of a database on crustal conductance in the fennoscandian shield // Earth Planets Space. V. 54. N 5. P.535–558. 2002. DOI:10.1186/BF03353044
- Shubin V.N. Global median model of the F2-layer peak height based on ionospheric radio-occultation and ground-based Digisonde observations // Adv. Space Res. V. 56. P. 916–928. 2015. DOI:10.1016/j.asr.2015.05.029