УДК 53.05

ОЦЕНКА ПОЛОЖЕНИЯ И РАЗМЕРА ОБЛАСТИ РАССЕЯНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА ПО ДАННЫМ ВЫСОКОШИРОТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННЫХ ТОЧКАХ

© 2021 г. А. С. Никитенко^{1,} *, О. М. Лебедь¹, Ю. В. Федоренко¹, Ю. Маннинен², Н. Г. Клейменова³, Л. И. Громова⁴

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия ²Геофизическая обсерватория Соданкюля, Соданкюля, Финляндия ³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия ⁴Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук, Москва, Россия *E-mail: alex.nikitenko91@gmail.com Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г.

Представлены результаты анализа одновременных наблюдений очень низкочастотных всплесков аврорального хисса в пространственно-разнесенных точках — Баренцбург (Архипелаг Шпицберген), Ловозеро (Кольский полуостров, Россия) и Каннуслехто (Финляндия). Проведено сравнение результатов наблюдений с результатами моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности и в волноводе Земля—ионосфера.

DOI: 10.31857/S0367676521030200

введение

В 50-60-х годах прошлого века были предприняты первые попытки исследования особенностей выхода к Земле магнитосферных очень низкочастотных (ОНЧ) (от сотен герц до десятков килогерц) излучений, и было введено понятие области выхода, как некой области пространства, в которой волны покидают нижнюю ионосферу [1]. Эти работы были основаны на предположении о регистрируемом у земной поверхности ОНЧ излучении как сумме плоских волн: падающей и отраженной от бесконечно проводящей земной поверхности. Дальнейшие исследования были направлены на определение положения центра области выхода, игнорируя ее пространственные размеры. Для проведения оценок применялись различные методы: а) метод гониометра [1], б) подход, основанный на измерениях азимутального угла вектора Пойнтинга [2], в) метод определения азимутальных углов, свободный от поляризационной ошибки [3]. Отметим, что при этом не учитывались эффекты распространения волн в нижней ионосфере и волноводе Земля-ионосфера.

Авторы работ [4, 5] впервые измерили скорость пространственного затухания и поляризацию магнитного поля магнитосферных ОНЧ излучений по данным наблюдений на сети пространственно-разнесенных наземных станций. Полученные результаты свидетельствовали о том, что волновое поле ОНЧ излучений на земной поверхности пространственно ограничено. Для объяснения этого в работе [6] была предложена двумерная математическая модель области выхода, в которой падающее излучение рассматривалось в виде гауссова пучка волн. Позже на основе этой модели в работе [7] был разработан метод локализации области выхода ОНЧ волн, основанный на сравнении результатов моделирования и экспериментальных данных.

В работе [8] была предложена следующая схема распространения ОНЧ волн от области их генерации к земной поверхности применительно к излучениям типа аврорального хисса. На высотах в несколько тысяч километров вследствие развития черенковского резонанса электронов происходит генерация квазиэлектростатических волн с большими углами волновых нормалей. В результате рассеяния на мелкомасштабных неоднород-



Рис. 1. Огибающие горизонтальной компоненты магнитного поля H_{τ} , построенные по данным наблюдений в обс. Баренцбург (сплошная линия), обс. Ловозеро (штриховая линия) и Каннуслехто (штрих-пунктирная линия) (*a*); распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода $p(\varphi)$ вместе с усредненными индексами круговой поляризации P_c , рассчитанные для интервалов *I*) 19:04–19:05 UT и *2*) 19:34–19:35 UT (*б*).

ностях в верхней ионосфере квазиэлектростатические волны преобразуются в моды электромагнитного типа, способные в дальнейшем выйти в атмосферу и достичь земной поверхности. Заметим, что в таком представлении использование понятия области выхода и ее локализации не имеет под собой физического основания. По результатам наземных наблюдений можно судить только об изменениях положения области выхода, а не о причине этих изменений. Более того, вследствие шумовой природы поля ОНЧ излучений типа авроральный хисс, параметры, определяющие положение области выхода этих волн. изменяются во времени случайным образом, что должно быть охарактеризовано плотностями распределений вероятности этих параметров. Однако широко применяемые сегодня методы используют только средние значения параметров, что снижает информативность наземных измерений.

В данной работе проведено исследование азимутальных углов прихода и поляризации ОНЧ излучений типа авроральный хисс [9, 10] на основании анализа плотности распределения абсолютной величины вектора Пойнтинга по измеренным азимутальным углам в пространственно-разнесенных точках в высоких широтах. Для интерпретации результатов наблюдений и локализации области рассеяния ОНЧ волн выполнено моделирование распространения аврорального хисса от области генерации к наземному наблюдателю с учетом отражений от ионосферы и земной поверхности.

АППАРАТУРА

Регистрация горизонтальных компонент магнитного поля H_x , H_y и вертикальной компоненты электрического поля E_z ОНЧ волн проводилась с использованием идентичных систем сбора данных в трех пространственно разнесенных точках – Баренцбург (архипелаг Шпицберген, 78.07° с.ш., 14.21° в.д.), Ловозеро (Россия, 67.97° с.ш., 35.02° в.д.) и Каннуслехто (Финляндия, 67.74° с.ш., 26.27° в.д.) (см. рис. 16, 1в). Для измерений компонент H_x и H_y применялись рамочные антенны, а для измерения компоненты E_z – вертикальная дипольная антенна. Перед началом наблюдений была проведена тщательная калибровка антенн. Для калибровки использовалось устройство для измерений амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и фазо-частотных характеристик (ФЧХ) измерительных каналов регистраторов компонент ЭМ поля [11]. Для определения коэффициента передачи магнитных антенн с использованием тороида через их плоскости создавался магнитный поток известной величины. ФЧХ электрической антенны определялась с использованием эквивалента антенны, а АЧХ оценивалась из отношения амплитуд горизонтального магнитного и вертикального электрического поля сигналов, сгенерированных в результате разрядов молний (атмосфериков), на частотах ниже поперечного резонанса волновода Земляионосфера. Каждый приемник обладает точной привязкой к мировому времени [12]. Используемый аналого-цифровой преобразователь (АЦП) работает с частотой дискретизации ~32 кГц. Верхняя регистрируемая частота сигнала составляет 15 кГц. Более подробно особенности регистрирующей аппаратуры описаны в работе [13].

МЕТОД АНАЛИЗА

Для построения амплитудных вариаций компонент поля H_x , H_y и E_z аврорального хисса использовался полосовой фильтр с центральной частотой f_0 , выбранной вблизи максимума интенсивности этих излучений и равной ~8500 Гц, и шириной полосы пропускания $f_{\Delta\omega}$, равной 1000 Гц.

Особенности генерации и распространения аврорального хисса исследовались по результатам анализа распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода $p(\phi)$ и индексу круговой поляризации магнитного поля P_c . При расчетах $p(\phi)$ использовалось предположение об эргодичности шума, при этом распределение по ансамблю реализаций заменялось распределением по времени [14]. Расчет усредненного индекса круговой поляризации P_c был выполнен по методике, описанной в работе [15]. Индекс круговой поляризации P_c принимает значения от -1до 1. Значение $P_c > 0$ означает, что вектор магнитного поля вращается в том же направлении, что и электроны в магнитном поле, и поляризация правая. При $P_c < 0$ вращение происходит в обратном направлении и поляризация левая. Если $|P_c| = 1$, вектор магнитного поля описывает окружность и, соответственно, поляризация круговая. При $P_c = 0$ поляризация линейна. Мгновенные значения индекса Р_с мало изменяются во времени, поэтому далее распределение *P_c* не рассматривалось.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Мы использовали численную модель распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности, разработанную нами в работе [14]. Эта модель включает рассмотренное в работе [8] распространение ОНЧ волн в отсутствие дактов – областей, вытянутых вдоль линий магнитного поля, с повышенной или пониженной концентрацией заряженных частиц. В потоке электронов, пространственно-ограниченном гауссовой функцией, происходит генерация квазиэлектростатических волн. Область, занятая мелкомасштабными неоднородностями, на которых происходит рассеяние квазиэлектростатических волн, задается гауссовой плотностью распределения вариаций электронной концентрации N_e снулевым средним и стандартным отклонением в 1-10% от N_e и пространственной корреляционной функцией с радиусом корреляции порядка нескольких десятков метров в горизонтальной плоскости. Для описания рассеяния волн используется борновское приближение [16]. Расчет распространения квазиэлектростатических волн от области генерации до области рассеяния и рассеянных волн до земной поверхности проводится в приближении плоскослоистой среды путем решения волнового уравнения в каждом слое. Для поиска решения используется полно-волновой метод [17]. Модель ионосферы взята из работы [14].

АНАЛИЗ УГЛОВ ПРИХОДА И ПОЛЯРИЗАЦИИ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА

В качестве примера рассмотрим один из типичных случаев наблюдения всплесков аврорального хисса 3 февраля 2019 г., зарегистрированных на станциях Баренцбург (ВАВ), Ловозеро (LOZ) и Каннуслехто (КАN) в 18:30–20:00 UT. На рис. 1*а* показаны рассчитанные огибающие, т.е. временные вариации горизонтальной компоненты магнитного поля $H_{\tau} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$, аврорального хисса в выбранной полосе частот. С 18:50 до 19:17 UT всплеск аврорального хисса наблюдался только в ВАВ, а с 19:25 по 19:50 UT отмечалась последовательность похожих всплесков на всех трех станциях.

На рисунке 16 приведены карты распределений $p(\phi)$, рассчитанных для двух интервалов 19:04-19:05 UT и 19:34-19:35 UT, вместе с усредненными за эти интервалы значениями индекса круговой поляризации магнитного поля Р. По данным наблюдений в ВАВ в первом интервале индекс круговой поляризации был равен 0.3, а максимум распределения $p(\phi)$ указывал на югозапад с разбросом по углам около 30-40 градусов (рис. 16). Правая круговая поляризация аврорального хисса свидетельствовала о том, что рассеянные волны распространялись в ионосфере к Земле на так называемой моде вистлеров [18], моде электромагнитного типа, способной выйти в атмосферу и достичь земной поверхности. После выхода волн из ионосферы, за счет отражений от Земли и от анизотропной ионосферы, правая круговая поляризация трансформировалась в линейную. Небольшие положительные значения индекса круговой поляризации позволили предположить, что проекция области рассеяния на земную поверхность находилась на расстоянии порядка 300-400 км от ВАВ в направлении на юго-запад. Отсутствие излучений в LOZ и KAN, по-видимому, вызвано большим затуханием при распространении волн в волноводе Земля-ионосфера.

Начиная примерно с 19:25 UT, всплеск аврорального хисса наблюдался во всех трех точках (интервал 2 на рис. 1*a*). Максимум распределения $p(\varphi)$ в BAB (рис. 1*б*) указывал на юго-запад с меньшим, чем в интервале 1, разбросом по углам в 10–15 градусов, а индекс круговой поляризации P_c был равен 0.19. Следовательно, практически линейно поляризованные волны приходили в точку наблюдений с юго-запада. В КАN максимум распределения с разбросом около 40–50 градусов указывал на запад-юго-запад. Индекс круговой поляризации P_c был равен 0.48, т.е. поляризация волн была правой эллиптической. Распределение $p(\varphi)$ в LOZ имеет значительно меньший разброс по углам, а его максимум указывает также на запад-



Рис. 2. Модельные распределения на земной поверхности горизонтальной компоненты магнитного поля H_{τ} и индекса круговой поляризации магнитного поля P_c вместе с распределениями $p(\phi)$ (рисунки справа), полученные для интервала 1 (a, δ) и интервала 2 (e, c). Знак "+" показывает центр засвечиваемого на земной поверхности пятна, знаком "×" обозначена широта, на которой происходит генерация электростатических волн, штриховой линией показана проекция области рассеяния на земную поверхность; стрелками обозначено направление, обратное направлению усредненного вектора Пойнтинга.

юго-запад. Поляризация магнитного поля близка к линейной — $P_c = 0.18$.

ОЦЕНКА ПОЛОЖЕНИЯ РАССЕИВАЮЩЕЙ ОБЛАСТИ

Для объяснения результатов наблюдений было проведено моделирование распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности, в предположении что область рассеяния волн находилась на высоте ~2000 км. Использовались параметры ионосферы, соответствующие 3 февраля 2019 г. 19:00 UT. Для того, чтобы воспроизвести наблюдаемые на станциях распределение $p(\varphi)$ и индекс круговой поляризации P_c , мы подбирали положение и поперечный размер области рассеяния. Максимум двумерной гауссовой функции, описывающей форму области рассеяния в проекции на плоскость, параллельную земной поверхности, и область генерации квазиэлектростатических волн, расположенная значительно выше области рассеяния, находятся на одной силовой линии геомагнитного поля.

ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ том 85 № 3 2021

Результаты моделирования для интервала 1, наилучшим образом описывающие результаты измерений, приведены на рисунке 2. В пределах засвечиваемого на земной поверхности "пятна", где наблюдается наибольшая интенсивность поля (рис. 2a), направления, обратные направлению усредненного вектора Пойнтинга, указывают на максимум интенсивности. Индекс круговой поляризации в пределах "пятна" положителен и близок к единице, что свидетельствует о выраженной правой поляризации магнитного поля. Положение "пятна" и проекции на земную поверхность области рассеяния не совпадают вследствие отклонения силовой линии магнитного поля от вертикали. При удалении на 400-500 км от центра "пятна" наблюдается резкое уменьшение интенсивности поля, отклонение вектора Пойнтинга от направления на максимум интенсивности здесь может составлять 30-40 градусов, поляризация сменяется сначала на линейную, а затем на левую. Размер области рассеяния составляет около 100 км. Эта величина и положение области рассеяния оценены при сравнении полученных при моделировании распределения $p(\phi)$, индекса P_c и интенсивности магнитного поля в KAN и LOZ относительно ВАВ с результатами измерений. Отметим, что в этом случае модель предсказывает значение интенсивности магнитного поля в КАМ и LOZ на 15-17 дБ ниже, чем в ВАВ. В реальных условиях эта величина сравнима с интенсивностью шума волновода Земля-ионосфера, что объясняет отсутствие всплеска аврорального хисса в КАN и LOZ.

Результаты моделирования для интервала 2 показаны на рис. 2*в*, 2*г*. Величины $p(\phi)$ и P_c и отношение интенсивностей ОНЧ излучений в КАМ и LOZ удалось воспроизвести с приемлемой точностью при положении рассеивающей области, представленном на рис. 26, 2г. Однако, нам не удалось подобрать положение и размеры единственной рассеивающей области, при которых результаты моделирования соответствовали бы измеренным на всех трех станциях величинам. Можно предположить, что в интервале времени 2 на станциях KAN и LOZ регистрировался сигнал от одной рассеивающей области, а на станции ВАВ – от другой. Синхронное начало всплесков в 19:25 UT свидетельствует о том, что выходящие к наземному наблюдателю ОНЧ волны образовались в результате рассеяния единственного пакета электростатических волн на двух или нескольких кластерах неоднородностей.

выводы

Выполнен анализ одновременных наблюдений аврорального хисса 3 февраля 2019 г. в трех пространственно-разнесенных точках - обс. Баренцбург (архипелаг Шпицберген), Каннуслехто (Финляндия) и обс. Ловозеро (Россия). Обнаружены случаи, когда излучения регистрировались только в обс. Баренцбург и случаи, когда всплески аврорального хисса наблюдались на всех трех станциях одновременно. Проведена интерпретация полученных результатов с использованием разработанной нами модели [14] распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности. Показано, что всплеск аврорального хисса, наблюдаемый только в обс. Баренцбург в 18:50-19:17 UT, по-видимому, обусловлен существованием рассеивающей области относительно небольших размеров к юго-западу от точки наблюдений. Появление всплесков аврорального хисса одновременно на всех трех точках в 19:25 UT, может быть результатом одновременного существования двух рассеивающих областей мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации, расположенных на разных широтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bullough K., Sagredo J.L. // Planet. Space Sci. 1973. V. 21. No. 6. P. 899.
- Leavitt M.K. // Stanford Electron. Lab. USA. Technical Report. 1975. V. 3456–2. P. 167.
- Tsuruda K., Ikeda M. // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. No. A9. P. 5325.
- 4. *Tsuruda K., Machida S., Terasawa T. et al.* // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. No. A2. Art. No. 742.
- Machida S., Tsuruda. K. // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. No. A3. Art. No. 1675.
- Nagano I., Mambo M., Shimbo T., Kimura I. // Mem. Nat. Inst. Polar Res. Spec. Issue. 1986. V. 42. P. 34.
- Ozaki M., Yagitani S., Nagano I. et al. // Polar Sci. 2008. V. 2. No. 4. P. 237.
- Sonwalkar V.S., Harikumar J. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. No. A8. Art. No. 18867.
- Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г. и др. // Геомагн. и аэроном. 2020. Т. 60. № 2. С. 216; Pilgaev S.V., Fedorenko Yu.V., Kleimenova N.G. et al. // Geomagn. Aeron. 2020. V. 60. No. 2. P. 212.
- Manninen J., Kleimenova N., Kozlovsky A. et al. // Geophys. Res. Let. 2020. V. 47. Art. No. e2019GL086285.
- Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Филатов М.В. и др. // ПТЭ. 2018. Т. 61. № 6. С. 49; Pilgaev S.V., Larchenko A.V., Filatov M.V. et al. // Instr. Exper. Tech. 2018. V. 61. No. 6. P. 809.
- Филатов М. В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. // ПТЭ. 2011. Т. 54. № 3. С. 73; Filatov M.V., Pilgaev S.V., Fedorenko Yu.V. // Instr. Exper. Tech. 2011. V. 54. No. 3. P. 361.
- Fedorenko Y., Tereshchenko E., Pilgaev S. et al. // Radio Sci. 2014. V. 49. P. 1254.

- Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю. и др. // Геомагн. и Аэроном. 2019. Т. 59. № 5. С. 618; Lebed O.M, Fedorenko Yu.V., Manninen J. et al. // Geomagn. Aeron. 2019. V. 59. No. 5. P. 577.
- 15. *Рытов С.М.* Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1976.
- Lehtinen, N.G., Marshall R.A., Inan U.S. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. No. A00E40.
- 17. Lehtinen N.G., Inan U.S. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. Art. No. A06301.
- 18. *Budden K.G.* The propagation of radio waves: The theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere. Cambridge University Press, 1985.

Localization of the scattering area of the auroral hiss by ground-based multipoint measurements at high latitudes

A. S. Nikitenko^{*a*, *}, O. M. Lebed^{*a*}, Yu. V. Fedorenko^{*a*}, J. Manninen^{*b*}, N. G. Kleimenova^{*c*}, L. I. Gromova^{*d*}

^aPolar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia ^bSodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, FIN-99600 Finland

^cSchmidt Institute of Physics of the Earth. Russian Academy of Sciences. Moscow, 123995 Russia

^dPushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Moscow, 108840 Russia *e-mail: alex.nikitenko91@gmail.com

We present the results of simultaneous observations of the auroral hiss at three points: Barentsburg (Spitsbergen archipelago), Lovozero (Kola Peninsula), and Kannuslehto (Northern Finland). We compared the observational results with the results of modeling of the propagation of the auroral hiss from the source region to the ground.