

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.61-65

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЛАСТИ ВЫХОДА ЕСТЕСТВЕННЫХ СНЧ/ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

А.С. Никитенко, О.М. Лебедь, Ю.В. Федоренко

ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия
e-mail: alex.nikitenko91@gmail.com

Аннотация. Предложен новый метод анализа данных наземных наблюдений горизонтальных компонент магнитного и вертикальной компоненты электрического поля естественных СНЧ/ОНЧ излучений, основанный на представлении результатов наблюдений в виде плотностей распределения вероятности не зависящих от амплитуды параметров поля излучений. Предложен метод оценки положения области выхода таких излучений из ионосферы к земной поверхности. Оценка основана на сравнении измеренных распределений с полученными в результате моделирования. Проведена локализация области выхода ОНЧ шипений, зарегистрированных в обл. Ловозеро и Верхнетуломский.

Введение

В геофизике большое внимание уделяется исследованию особенностей генерации и распространения естественных СНЧ/ОНЧ излучений по данным наземных наблюдений. Особый интерес представляет положение и динамика области выхода излучений из ионосферы к земной поверхности. Например, локализация области выхода СНЧ/ОНЧ всплесков важна при определении положения магнитосферного источника [8]. При исследовании связи поведения ОНЧ излучений с общей динамикой магнитосферы определение положения области выхода помогает оценить возможность распространения этих излучений вдоль плазмопаузы от области их генерации до точки наземной регистрации [1, 2].

Сегодня существует множество методов локализации области выхода. Наиболее распространенные методы основаны на представлении о падающем излучении как о плоской волне. Например, метод Пойнтинга или метод определения направления прихода по разности времен прихода сигнала в три пространственно разнесенные точки долгое время использовались для локализации области выхода. Однако, авторы [5, 9] на основе данных наземной регистрации естественных СНЧ/ОНЧ излучений в пространственно разнесенных точках показали, что приближение плоской волны не согласуется с экспериментальными наблюдениями. Авторы утверждают, что пространственное распределение интенсивности и поляризации регистрируемых на земной поверхности излучений зависит от положения и пространственной структуры области выхода излучений из ионосферы к земной поверхности. В работе [7] показано, что при локализации области выхода важно учитывать пространственную структуру области выхода, а также особенности распространения излучений сквозь нижнюю ионосферу и в волноводе Земля-ионосфера до точки регистрации этих излучений.

Все существующие на сегодняшний день методы локализации области выхода основаны на рассмотрении усредненных значений параметров поля СНЧ/ОНЧ излучений. Результаты спутниковых наблюдений свидетельствуют о том [3], что, зачастую, магнитосферное излучение стоит рассматривать как суперпозицию плоских волн со случайными волновыми нормальными. В таком случае при представлении наблюдаемых на земной поверхности параметров волнового поля излучений в виде их средних значений значительная часть информации может оказаться скрытой от наблюдателя. Во избежание этого параметры поля следует представлять в виде плотностей распределения вероятности. Далее будет показано, что форма этих плотностей распределения зависит от взаимного расположения области выхода и точки наблюдений.

Наземные наблюдения СНЧ/ОНЧ излучений

В настоящее время при интерпретации данных наземных наблюдений СНЧ/ОНЧ излучений чаще всего пользуются представлением параметров поля этих излучений в виде частотно-временной зависимости. Для такого представления записи компонент поля разбиваются на сегменты. Для каждого сегмента рассчитывается преобразование Фурье. После этих преобразований получается массив размером $N \times M$, где M - число сегментов, N - количество спектральных составляющих Фурье преобразования. Для каждого элемента массива рассчитываются параметры поля. Вследствие того, что в каждом сегменте находится много некоррелированных отсчетов ОНЧ сигнала, параметры поля усредняются. При этом часть информации может остаться скрытой от наблюдателя.

Рассмотрим частотно-временные зависимости обратного азимута вектора Пойнтинга и индекса круговой поляризации СНЧ/ОНЧ хисса, зарегистрированного 7 декабря 2014 г. в период 07:00-07:10 UT в обс. Ловозеро (рис. 1 a,b). Видно, что в частотном диапазоне 1.5-3 кГц обратный азимут принимал значения из диапазона 250-300°. Это свидетельствует о преимущественном приходе излучений в точку наблюдений с запада. Результаты наблюдений индекса круговой поляризации показывают, что у рассматриваемых СНЧ/ОНЧ всплесков он принимает значения $\approx 0.8-0.9$. Такие значения индекса говорят о том, что излучения обладают правой поляризацией, близкой к круговой [6]. Далее мы рассчитали плотность распределения обратного азимута вектора Пойнтинга и индекса круговой поляризации для полосы частот 2400 ± 50 Гц (рис. 1 c,d). Значения обратного азимута лежат в широком диапазоне углов $\sim 150^\circ$. Плотность распределения индекса круговой поляризации (рис. 1 d) показывает, что, несмотря на наличие выраженного максимума, значения индекса также рассеяны.

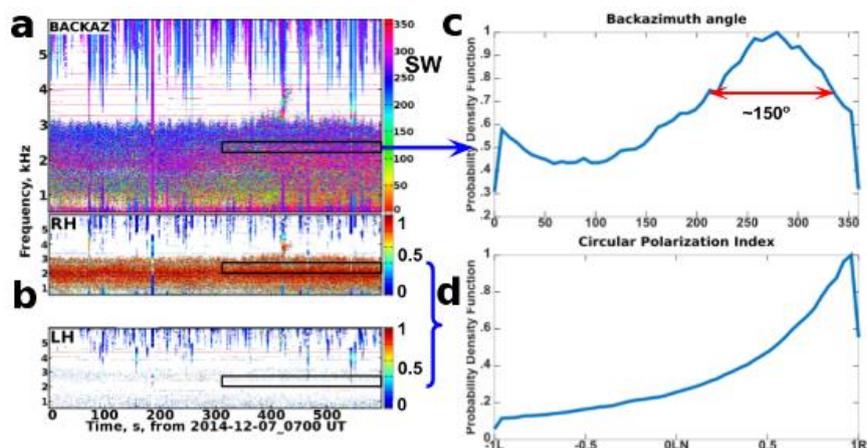


Рисунок 1. (a) Обратный азимут вектора Пойнтинга, (b) положительная (RH) и отрицательная (LH) части индекса круговой поляризации, (c) плотность распределения обратного азимута и (d) индекс круговой поляризации всплеска, зарегистрированного в обс. Ловозеро 07.12.2014 г. в период 07:00-07:10 UT.

Рассмотрим другой пример — СНЧ/ОНЧ хисса, зарегистрированный в обс. Ловозеро 27 января 2017 г. в период 03:20-03:30 UT (рис. 2). Из частотно-временной зависимости обратного азимута вектора Пойнтинга (рис. 2 e) следует, что часть энергии, находящаяся в полосе 2-3 кГц, приходит в точку наблюдения приблизительно с юго-востока. Индекс круговой поляризации в этой же полосе частот (рис. 2 f) показывает левую поляризацию, близкую к круговой. Плотность распределения обратного азимута, рассчитанная для сигнала в полосе частот 2400 ± 50 Гц, имеет два выраженных максимума (рис. 2 g). Это может быть интерпретировано, как существование в данном случае двух областей выхода. Индекс круговой поляризации (рис. 2 h) принимает преимущественно отрицательные значения. Отметим, что представление параметров поля в виде их усредненных значений дает иной результат.

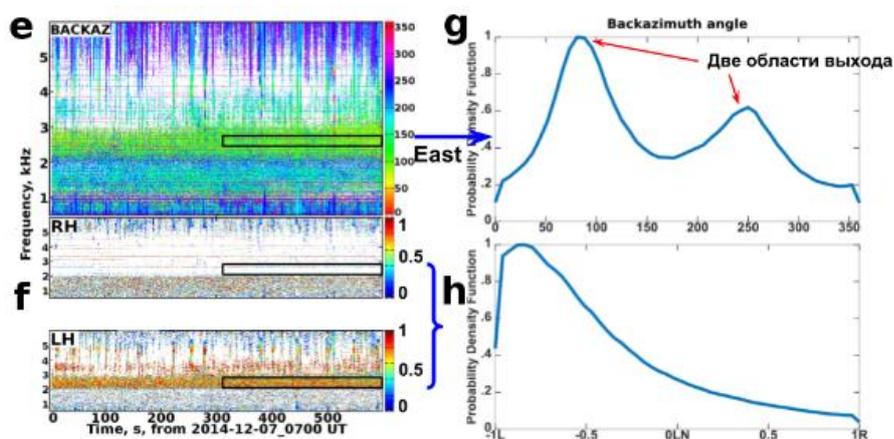


Рисунок 2. (e) Обратный азимут вектора Пойнтинга, (f) положительная (RH) и отрицательная (LH) части индекса круговой поляризации, (g) плотность распределения обратного азимута и (h) индекс круговой поляризации всплеска, зарегистрированного в обс. Ловозеро 27.01.2017 г. в период 03:20-03:30 UT.

При использовании представления параметров поля в виде частотно-временных зависимостей значительная часть информации остается скрытой от наблюдателя. Во избежание этого необходимо рассмотрение плотностей распределения вероятности тех или иных параметров поля. Также при локализации области выхода следует учитывать особенности распространения излучений в нижней ионосфере и волноводе Земля-ионосфера. Ниже предложен метод локализации области выхода излучений на основе рассмотрения плотностей распределения параметров поля и учета особенностей распространения излучений от области выхода до точки наблюдений.

Метод локализации области выхода

Мы будем рассматривать распространение СНЧ/ОНЧ излучений с высоты 120 км до земной поверхности. Ионосферу будем считать плоскостростистой. Плоскости ионосферных слоев и земной поверхности параллельны плоскости ХОУ, ось Х направлена на север, ось Y - на восток, а ось Z - вверх. Область выхода $g(x,y)$ будем задавать в виде полупрозрачного экрана, расположенного в плоскости ХОУ на высоте 120 км

$$g(x, y) = A \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right)$$

Здесь $A = 1/(2\pi\sigma_x\sigma_y)$, σ_x , σ_y - параметры, определяющие размеры $g(x,y)$ и, соответственно, области выхода.

На этот экран из магнитосферы падает плоская ОНЧ волна

$$w(x, y) = D \exp(ik_0[n_{wx}x + n_{wy}y] + i\phi)$$

Здесь D - амплитуда волны, ϕ - ее начальная фаза, n_{wx} , n_{wy} - горизонтальные компоненты волновых нормалей, $k_0 = \omega/c$ - волновое число в свободном пространстве, ω - круговая частота волны, c - скорость света в свободном пространстве, i - мнимая единица.

Поле волны за экраном задается в виде произведения функции пропускания экрана и выражения для плоской волны. Для разложения по плоским волнам поля за экраном воспользуемся преобразованием Фурье

$$G(n_x, n_y, n_{wx}, n_{wy}) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) w(x, y) e^{-ik_0(n_{wx}x + n_{wy}y)} dx dy$$

Рассмотрим распространение через экран суперпозиции случайных плоских волн. Отметим, что далее мы будем пользоваться только преобразованием Фурье, которое является линейной операцией. Благодаря этому операции преобразования и суммы можно переставлять местами. Разложение волнового поля за экраном от суперпозиции N случайных плоских волн можно представить в виде

$$G_s(n_x, n_y, n_{wx}, n_{wy}) = \sum_{j=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) D_j \exp(ik_0[n_{wxj}x + n_{wyj}y] + i\phi_j) e^{-ik_0(n_{wx}x + n_{wy}y)} dx dy$$

Обозначим решение волнового уравнения для каждой единичной плоской волны с горизонтальными компонентами (n_x, n_y) у бесконечно проводящей земной поверхности как $F(n_x, n_y)$. Поиск этого решения осуществлялся с использованием метода, предложенного в работе [4]. Спектр компонент поля у земной поверхности с учетом экрана и плотности распределения вероятности амплитуд, фаз и волновых нормалей падающих на экран из магнитосферы плоских волн определяется по формуле

$$F_g(n_x, n_y) = F(n_x, n_y) G_s(n_x, n_y, n_{wx}, n_{wy})$$

Плотность распределения амплитуд плоских волн, представляющих падающее излучение, мы задавали в виде распределения Рэлея. Их начальная фаза была распределена равномерно на интервале $[0, 2\pi]$. Плотность распределения по волновым нормалям считалась гауссовой с нулевым средним.

Использование плоскостростистой модели ионосферы позволяет ввести понятие конуса прохождения. Для СНЧ/ОНЧ волн этот конус составляет $1-7^\circ$. У плоской волны, угол падения которой превышает конус прохождения, при входе в нейтральную атмосферу вертикальная компонента волнового вектора становится мнимой и такие волны не распространяются. Мы выбирали распределения по волновым нормалям так, чтобы большинство волновых нормалей плоских волн, представляющих падающее излучение, лежало в конусе прохождения. Для локализации области выхода мы будем рассматривать параметры поля, не зависящие от амплитуды - направляющие косинусы вектора Пойнтинга и индекс круговой поляризации [6]. Направляющие косинусы определяются по формулам

$$S_x = \cos \alpha, \quad S_y = \sin \alpha$$

Здесь α - обратный азимут вектора Пойнтинга. Согласно определению [6] индекс круговой поляризации рассчитывается как

$$P_c = 2 \operatorname{Im}(H_x, H_y) P$$

Здесь H_x и H_y - горизонтальные компоненты магнитного поля, P - мощность магнитного поля.

Мы рассчитали плотности распределения вероятности этих параметров и произвели сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования. Оптимальным является положение области выхода, при котором плотности распределений, полученные в ходе моделирования, имеют наилучшее

совпадение с плотностями распределений, полученными в эксперименте. Локализация области выхода осуществлена путем поиска минимума целевой функции:

$$f = \sum_{j=1}^N \left[\left(p_j^{P_c} - w_j^{P_c} \right)^2 + \left(p_j^{S_x} - w_j^{S_x} \right)^2 + \left(p_j^{S_y} - w_j^{S_y} \right)^2 \right]$$

Здесь N – количество интервалов, w – оценка плотности распределения рассчитанных параметров поля, p – оценка плотности распределения измеренных параметров поля.

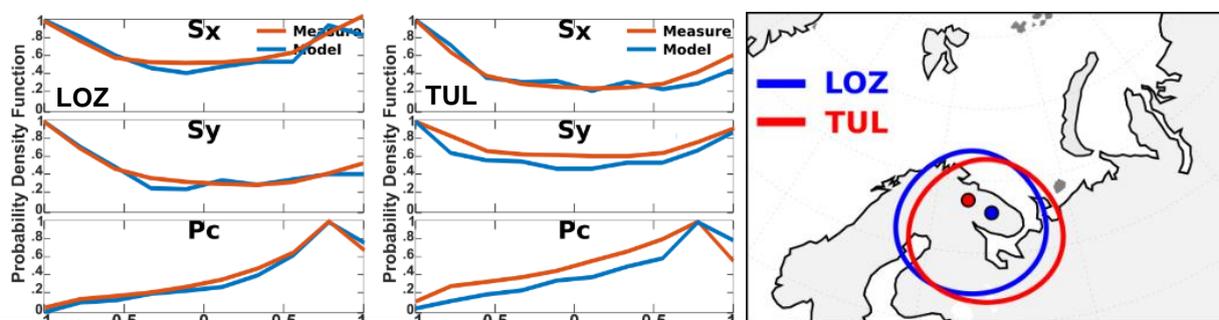


Рисунок 3. Плотности распределения направляющих косинусов обратного вектора Пойнтинга и плотности распределения индексов круговой поляризации СНЧ/ОНЧ всплеска, наблюдаемого в Ловозеро (левая панель) и Верхнетуломском (средняя панель) 07.12.2014 г. в период 07:00-07:10 UT и возможное положения его области выхода (правая панель).

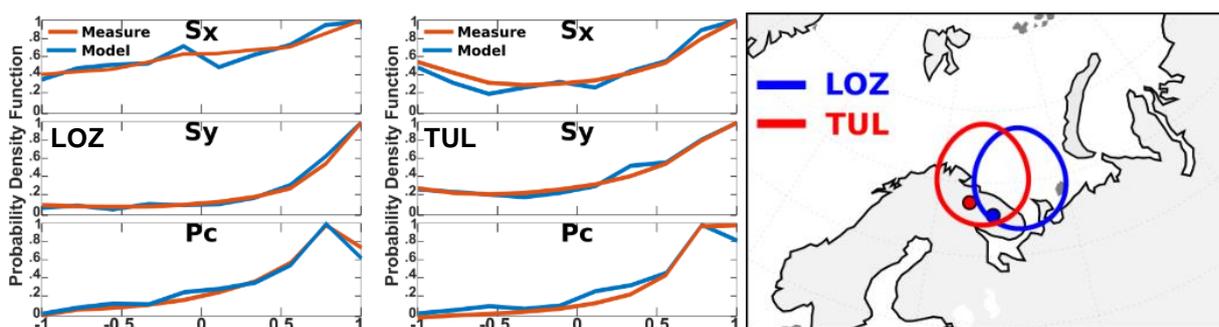


Рисунок 4. Плотности распределения направляющих косинусов обратного вектора Пойнтинга и плотности распределения индексов круговой поляризации СНЧ/ОНЧ всплеска, наблюдаемого в Ловозеро (левая панель) и Верхнетуломском (средняя панель) 07.12.2014 г. в период 09:00-09:20 UT и возможное положения его области выхода (правая панель).

Результаты анализа выделенных событий

В данном разделе мы представляем результаты оценки положения области выхода СНЧ/ОНЧ хиссов, зарегистрированных в обс. Ловозеро и Верхнетуломский. Первый случай — ОНЧ всплеск, зарегистрированный 7 декабря 2014 г. в период 07:00-07:10 UT. Записи компонент поля были подвергнуты фильтру с центральной частотой 2400 Гц и шириной полосы 50 Гц, рассчитывались плотности распределения индекса круговой поляризации и направляющих косинусов. Результаты представлены на рис. 3 (левая и средняя панели) красным цветом. Плотности распределения индекса круговой поляризации имеют выраженный максимум в окрестности значения 0.8. Это означает, что преобладает правая поляризация, близкая к круговой. Вероятно, что точки регистрации находятся достаточно близко к области выхода. Поскольку расстояние между станциями составляет около 170 км, можно предположить, что область выхода имеет большие размеры.

Мы моделировали распространение СНЧ/ОНЧ излучений сквозь нижнюю ионосферу к земной поверхности и подбирали оптимальное положение области выхода, описываемой гауссовой функцией пропускания, при котором полученные в ходе моделирования плотности распределения параметров поля соответствовали бы экспериментальным. Локализация области выхода проводилась отдельно для каждой станции. Плотности распределения параметров поля, полученные по результатам моделирования, представлены на рис. 3 (левая и средняя панели) синим цветом. Взаимное расположение станций и оптимальных положений области выхода представлены на рис. 3 справа. Окружностями обозначены изолинии уровня 0.1 гауссовой функции пропускания. Окончательные значения целевой функции для обс.

Ловозеро и Верхнетуломский равны 0.18 и 0.48, соответственно. Такие отличия целевой функции от нуля могут быть обусловлены как высоким уровнем атмосферного шума, так и несовершенством модели области выхода. При локализации области выхода были получены схожие результаты для двух станций.

При обработке данных регистрации ОНЧ хисса в обс. Ловозеро и Верхнетуломский 7 декабря 2014г. в период 09:10-09:20 UT был применен полосовой фильтр с полосой 1800 ± 50 Гц. Наблюдаемые плотности распределения параметров поля представлены на рис. 4. Стоит обратить внимание, что плотности распределения S_x и S_y , наблюдаемые в обс. Ловозеро и Верхнетуломский, схожи, что свидетельствует в пользу существования в ионосфере вытянутой области выхода. Результаты локализации области выхода, проведенной для каждой станции отдельно, несколько отличаются друг от друга (рис. 4 справа). Окончательные значения целевой функции равны 0.14 и 0.24 для обс. Ловозеро и обс. Верхнетуломский, соответственно. Область выхода находится к северо-востоку от обеих станций. Расстояние между центрами областей выхода составляет около 150 км.

Выводы

Предложен новый метод анализа результатов наземной регистрации горизонтальных компонент магнитного и вертикальной компоненты электрического поля естественных СНЧ/ОНЧ излучений, основанный на оценках плотности распределения не зависящих от амплитуды параметров поля излучений. Также предложен метод локализации их области выхода из ионосферы к земной поверхности при помощи сравнения результатов моделирования распространения СНЧ/ОНЧ излучений сквозь ионосферу к земной поверхности и экспериментально полученных плотностей распределения параметров поля. Такой подход позволяет учитывать шумовой характер СНЧ/ОНЧ излучений и особенности распространения излучений в нижней ионосфере и возбуждения волновода Земля-ионосфера.

Благодарности. Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН № 28 “Космос: исследование фундаментальных процессов и их взаимосвязей”.

Список литературы

1. Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Громова Л.И., Турунен Т., Федоренко Ю.В., Никитенко А.С., Зелинский Н.Р., Громов С.В. Условия в солнечном ветре и магнитосфере во время всплеска нетипичных ОНЧ шипений (08 декабря 2013 г.) // Геомагнетизм и Аэрономия, том 55, №3, с. 323. 2015, doi:10.7868/S0016794015030104
2. Маннинен Ю., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Никитенко А.С. Первые результаты одновременной регистрации ОНЧ излучений в двух близко расположенных пунктах в авроральных широтах // Геомагнетизм и Аэрономия, том 54, №1, с. 36-42. 2014, doi:10.7868/S0016794014010088
3. Lauben, D.S., U.S. Inan, and T.F. Bell (2002), Source characteristics of ELF/VLF chorus, *J. Geophys. Res.*, 107(A12), 1429, doi:10.1029/2000JA003019
4. Lehtinen, N.G., and U.S. Inan (2008), Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet, *J. Geophys. Res.*, 113, A06301, doi:10.1029/2007JA012911.
5. Machida, S., Tsuruda, K. (1984), Intensity and polarization characteristics of whistlers deduced from multi-station observations. *J. Geophys. Res.* 89, 1675-1682, doi:10.1029/JA089iA03p01675
6. Means J.D. (1972) Use of the three-dimensional covariance matrix in analyzing the polarization properties of plane waves // *J. Geophys. Res.* V. 77. N 28. P. 5551-5559, doi:10.1029/jA077i028p05551
7. Ozaki, M., et al. (2008), Localization of VLF ionospheric exit point by comparison of multipoint ground-based observation with full-wave analysis. *Polar Sci.* 2 (4), 237-249. doi:10.1016/j.polar.2008.09.001
8. Titova, E.E., et al. (2015), Identification of the source of quasiperiodic VLF emissions using ground-based and Van Allen Probes satellite observations, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 6137-6145, doi:10.1002/2015GL064911
9. Tsuruda, K., Machida, S., Terasawa, T., Nishida, A., Maezawa, K. (1982), High spatial attention of the Simple transmitter signal and natural VLF chorus observed at ground-based chain stations near Roberval, Quebec. *J. Geophys. Res.* 87, 742-750, doi:10.1029/JA087iA02P00742