Оценка положения области засветки аврорального хисса по наблюдениям на земной поверхности

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

Полярный геофизический институт

Аннотация

В высоких широтах одним из наиболее часто регистрируемых типов естественных ОНЧ-излучений магнитосферного происхождения является авроральный хисс (auroral hiss) [Sonwalkar, Harikumar, 2000]. Этот тип шумовых излучений регистрируется в широком диапазоне частот (от нескольких сотен герц до сотен килогерц) с максимумом спектра мощности магнитного поля вблизи земной поверхности на частотах 8–10 кГц. В экваториальной области аврорального овала хисс наиболее часто регистрируется в интервале 20–01 MLT при слабой геомагнитной активности (K_p<3) [Клейменова и др., 2019].

Считается, что генерация аврорального хисса связана с высыпаниями мягких электронов с энергиями 0.1–10 кэВ и происходит на высотах порядка 5-20 тыс. км. При выполнении условия черенковского резонанса (равенства фазовой скорости волны и продольной скорости потока электронов) генерируются квазиэлектростатические волны, распространяющиеся далее до высот порядка 800-2000 км, где они рассеиваются на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации. Та часть рассеянных волн, у которых горизонтальная компонента вектора показателя преломления меньше единицы, может пройти через верхнюю стенку волновода Земля-ионосфера и достигнуть земной поверхности.

Регистрация аврорального хисса наземными станциями возможна в пределах так называемой области засветки — географической зоны, внутри которой интенсивность ОНЧ-излучения превышает уровень собственных шумов волновода Земля-ионосфера. Данная работа направлена на получение количественных оценок положения центра области засветки. Для достижения этой цели с помощью полного решения волнового уравнения в плоскослоистой среде проведено моделирование процессов генерации и распространения аврорального хисса к земной поверхности в условиях ионосферы, возмущенной высыпаниями высокоэнергичных электронов. На основе полученных в ходе моделирования результатов расчета компонент электромагнитного поля (H_x, H_y, E_z), оценено пространственное распределение таких параметров аврорального хисса, как индекс круговой поляризации и направление вектора Пойнтинга. Эти параметры позволяют оценить расстояние до центра области засветки и направление на него.

Проанализирован случай регистрации аврорального хисса в обсерваториях «Ловозеро» и «Баренцбург» 05 января 2019 г. в 21:00 UT. Показана возможность оценки положения центра области засветки авроральным хиссом земной поверхности при достаточно высоких значениях отношения сигнал/шум регистрируемого сигнала.

Sonwalkar V.S., Harikumar J. An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities // JGR, V. 105, No. A8, pp. 18867-18883, 2000. DOI: 10.1029/1999JA000302.

Клейменова Н., Маннинен Ю., Громова Л. и др. Всплески ОНЧ-излучений типа «авроральный хисс» на земной поверхности на L5.5 и геомагнитные возмущения // Геомагнетизм и аэрономия. 2019, т. 59, No 3, с. 291–300. DOI: 10.1134/S0016794019030088.

Описание модели

Для анализа прохождения аврорального хисса в ионосфере в различных гелиогеофизических условиях, мы воспользовались методом численного решения волнового уравнения (full-wave method) в плоскослоистой среде, описанным в работе [Lehtinen, Inan, 2008].

Генерируемая квазиэлектростатическая волна имеет продольную компоненту вектора показателя преломления n_z (вдоль магнитного поля), рассчитываемую из условия черенковского резонанса: $n_z = c/V_{\|}$, где c - скорость света, $V_{\|}$ - проекция скорости электрона на направление магнитного поля Земли. Поперечная компонента вектора показателя преломления $n_{\perp}$ определялась из дисперсионного соотношения $\det\left(n^2\mathrm{I} - \mathbf{n}\mathbf{n}^{\mathrm{T}}\hat{\varepsilon}\right) = 0$, где I – единичная матрица, **n** – вектор показателя преломления, $\hat{\varepsilon}$ – тензор диэлектрической проницаемости среды, символ $^{\mathrm{T}}$ означает транспонирование вектора **n**. Вследствие цилиндрической симметрии задачи азимутальные координаты вектора **n** не определены и считались равномерно распределенными в интервале [0, 2π).

Для анализа распространения квазиэлектростатических волн от области генерации к земной поверхности мы рассчитывали зависимость от высоты частоты нижнего гибридного резонанса f_{LHR} [Kimura, 1966] и модуля вектора Пойнтинга идущей вниз волны относительно места генерации S_d /S_{dtop}:

$$f_{LHR}^2 = \frac{1}{M_{eff}} \frac{f_p^2 f_c^2}{f_p^2 + f_c^2} \qquad M_{eff} = \frac{m_e}{N_e} \sum_i \frac{N_i}{m_i}$$

Здесь m_e и m_i - масса электрона и иона сорта i; N_e и N_i - концентрации электронов и ионов сорта i; f_p - плазменная частота электронов; f_c - гирочастота электронов. В данной работе учитывались три сорта ионов: H^+ , He^+ и O^+ .

$$S_d = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}$$

$$S_x = E_y H_z^* - E_z H_y^*, S_y = E_z H_x^* - E_x H_z^*, S_z = E_x H_y^* - E_y H_x^*$$

Здесь знак «*» означает комплексное сопряжение, E_j и H_j - компоненты электромагнитного поля, j = x, y, z. S_{dtop} - значение модуля вектора Пойнтинга идущей вниз квазиэлектростатической волны на высоте генерации. Компоненты поля рассчитывались в системе координат: x – на север, y - на восток, z - вниз.

Lehtinen N.G., Inan U.S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet // Journal of Geophysical Research, V. 113, A06301, 2008.

Kimura I. Effects of ions on whistler-mode ray tracing // Radio Science, vol. 1, no. 3, pp. 269-283, 1966. DOI: 10.1002/rds196613269.

Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю. и др. Моделирование прохождения аврорального хисса от области генерации к земной поверхности. Геомагнетизм и аэрономия. 2019, т. 59, No 5, с. 618–627. DOI: 10.1134/S0016794019050079.

Описание модели

Поток авроральных электронов, вызывающий генерацию квазиэлектростатических волн, распространяется из магнитосферы к Земле вдоль силовых линий магнитного поля и приводит к возникновению полярных сияний. Поскольку поток электронов ограничен в пространстве, можно предположить, что область мелкомасштабных неоднородностей, а вместе с ней и волновые поля, также локализованы в пространстве. Исходя из этого, пространственное распределение интенсивности рассеянных волновых полей на высоте h_{irr} мы задавали в виде гауссианы

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

Здесь σ_x и σ_y – характерные размеры области мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в пространстве (x, y). В нашей работе принималось $\sigma=\sigma_x=\sigma_y$. Отметим, что поскольку конкретное положение области ионосферных неоднородностей неизвестно, h_{irr} и σ являлись варьируемыми параметрами модели.

На основе рассчитанных в ходе моделирования значений компонент поля хисса в каждой точке горизонтальной плоскости (x, y) на земной поверхности мы оценили индекс круговой поляризации P_c [Рытов, 1966] и азимутальный угол вектора Пойнтинга φ_p [Tsuruda, 1979]. Эти параметры дают представление о расстоянии до центра области засветки и направлении на него.

$$P_c = \frac{2\Im\left(H_x H_y^*\right)}{H_x H_x^* + H_y H_y^*}$$

$$\varphi_p = \mathrm{atan2}(\Re(E_z H_x^*), \Re(E_z H_y^*))$$

Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1966, 404 с.

Tsuruda, K., and M. Ikeda (1979), Comparison of three different types of VLF direction-finding techniques, J. Geophys. Res., 84(A9), 5325–5332. DOI: 10.1029/JA084iA09p05325.

Выбор входных параметров модели

Расчет проводился для частоты волны *f*, равной 8 кГц, где наблюдается максимум спектра мощности авроральных хиссов у земной поверхности.

Величину и направление магнитного поля Земли задавали по модели Н.А. Цыганенко. Моделирование проводилось для силовой линии, пересекающей земную поверхность в точке с координатами обс. Ловозеро (зенитный угол линии магнитного поля, отсчитываемый от вертикали вниз, здесь составляет 11.7°).

Для расчета концентраций электронов и ионов мы использовали стандартную эмпирическую модель IRI-2020. Концентрация и температура нейтральных частиц, необходимые для расчета частоты столкновений, оценивались по модели NRLMSISE-00. Для момента времени 20:00 UT, когда наиболее часто наблюдаются хиссы, были выбраны три ионосферных профиля электронной концентрации, отвечающие разным уровням геомагнитной возмущенности: 1) 24.01.2025, K_p=1, 2) 08.10.2024, K_p=4, 3) 03.03.2024, K_p=6 (рис. 1).

В настоящей работе мы использовали типовое распределение энергий авроральных электронов (энергетический спектр), приведенное в работе [Pulliam et.al., 1981] (рис. 2). Известно, что генерация свистовых волн будет происходить только на возрастающем участке распределения, где выполняется условие $\partial F/\partial W_e > 0$ и наблюдается эффект, обратный затуханию Ландау [Stix, 1992]. В данном случае в распределение входили электроны с энергиями от 1 до 2.7 кэВ. Распределение высот, на которых происходит генерация волн, из общих соображений предполагалось равномерным в диапазоне от 2100 до 20000 км.

Моделирование производилось для следующих параметров области ионосферных неоднородностей: h_{irr} составляла 400 и 800 км над земной поверхностью, а σ равнялась 20, 50 и 100 км.

Pulliam D.M., Anderson H.R., Stamnes K., Rees M.H. Auroral electron acceleration and atmospheric interaction (1) rocket-born observation and (2) scattering calculation // JGR, V. 86, pp. 2397-2404, 1981
Stix T. Waves in Plasmas. American Institute of Physics, 1992, 579 p.

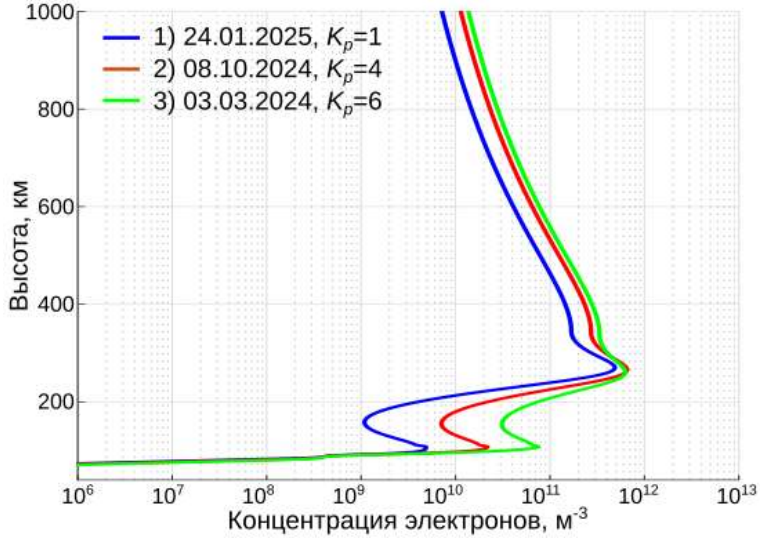


Рис. 1. *Зависимости концентрации электронов от высоты для трех ионосфер*

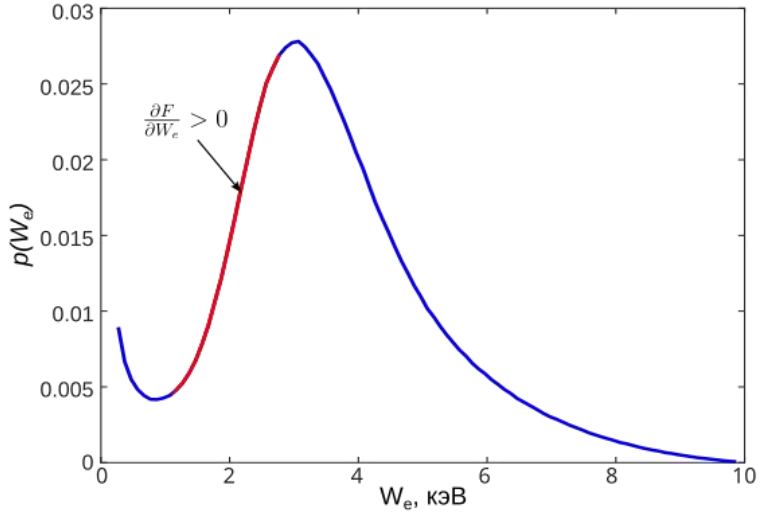


Рис. 2. *Типовое распределение авроральных электронов по энергиям [Pulliam et al., 1981]*

Результаты моделирования распространения квазиэлектростатических волн от области генерации к земной поверхности

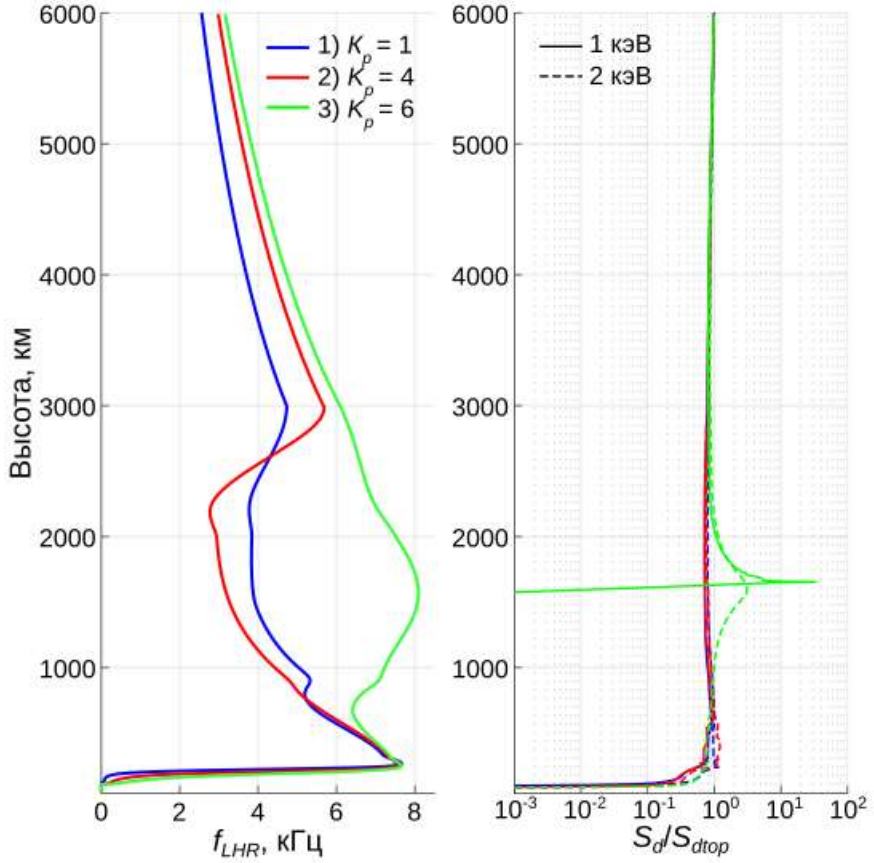


Рис. 3. *Высотные зависимости частоты нижнего гибридного резонанса f_{LHR} (**слева**) и модуля вектора Пойнтинга идущей вниз квазиэлектростатической волны относительно места генерации S_d/S_{dtop} (**справа**) для трех выбранных ионосфер*

Рост значений f_{LHR} на высотах порядка 1500 км для ионосферы № 3 обусловлен существенным увеличением относительной концентрации легких ионов H^+ и He^+ при одновременном снижении доли O^+ в условиях повышенной геомагнитной возмущенности (K_p=6) в модели IRI-2020.

Результаты моделирования показали, что для ионосферы № 3 при попадании квазиэлектростатической волны в область, где ее частота совпадает с локальной частотой нижнего гибридного резонанса $f=f_{LHR}$ (на высоте 1730 км, см. рис. 3 слева), волна испытывает отражение. При этом модуль вектора Пойнтинга идущей вниз волны резко устремляется к нулю (см. рис. 3 справа, сплошная линия), указывая на прекращение распространения ее энергии вниз.

В то же время квазиэлектростатическая волна, сгенерированная электроном с большей энергией (2 кэВ) (см. рис. 3 справа, штриховая линия), имеет меньшую продольную компоненту вектора показателя преломления и, как следует из дисперсионного уравнения для квазиэлектростатической волны, меньший угол волнового вектора относительно магнитного поля. В этом случае, по-видимому, ей удается преодолеть нижний гибридный резонанс и дойти до волновода Земля-ионосфера.

Отражение волны с частотой 8 кГц в возмущенной ионосфере при K_p=6 хорошо согласуется со статистикой наблюдений аврорального хисса, согласно которой во время сильных геомагнитных возмущений хисс на земной поверхности не регистрируется. Тот факт, что хисс отражается на высоте порядка 1700 км, позволяет предположить, что мелкомасштабные неоднородности, на которых должно произойти рассеяние хисса с возникновением волн с n_p<1, располагаются ниже этой границы. Таким образом, есть все основания полагать, что рассеяние аврорального хисса может происходить на неоднородностях F-слоя ионосферы, расположенных ниже 1000 км.

Результаты моделирования: P_c

На рис. 4 (вверху) показаны результаты оценки пространственного изменения индекса круговой поляризации для заданной конфигурации области рассеяния. Точкой отмечен центр симметрии пространственного распределения поляризации. Эта точка является искомым центром области засветки. Видно, что она смещена к юго-западу от Ловозеро, что обусловлено наклоном силовой линии магнитного поля.

Из рисунка видно, что пространственное распределение P_c обладает круговой симметрией, следовательно, целесообразно оценивать изменение индекса круговой поляризации в радиальном направлении. На рис. 4 (внизу) сплошной линией показано среднее значение P_c вдоль лучей, направленных от центра, а цветом указан диапазон его среднеквадратического отклонения. Видно, что разброс отклонений от среднего значения невелик.

По мере удаления от центра области засветки поляризация изменяется на расстоянии порядка 350 км с правой ($P_c > 0$) на левую ($P_c < 0$). Это дает возможность использовать P_c в качестве надежного параметра для оценки расстояния до центра области засветки аврорального хисса.

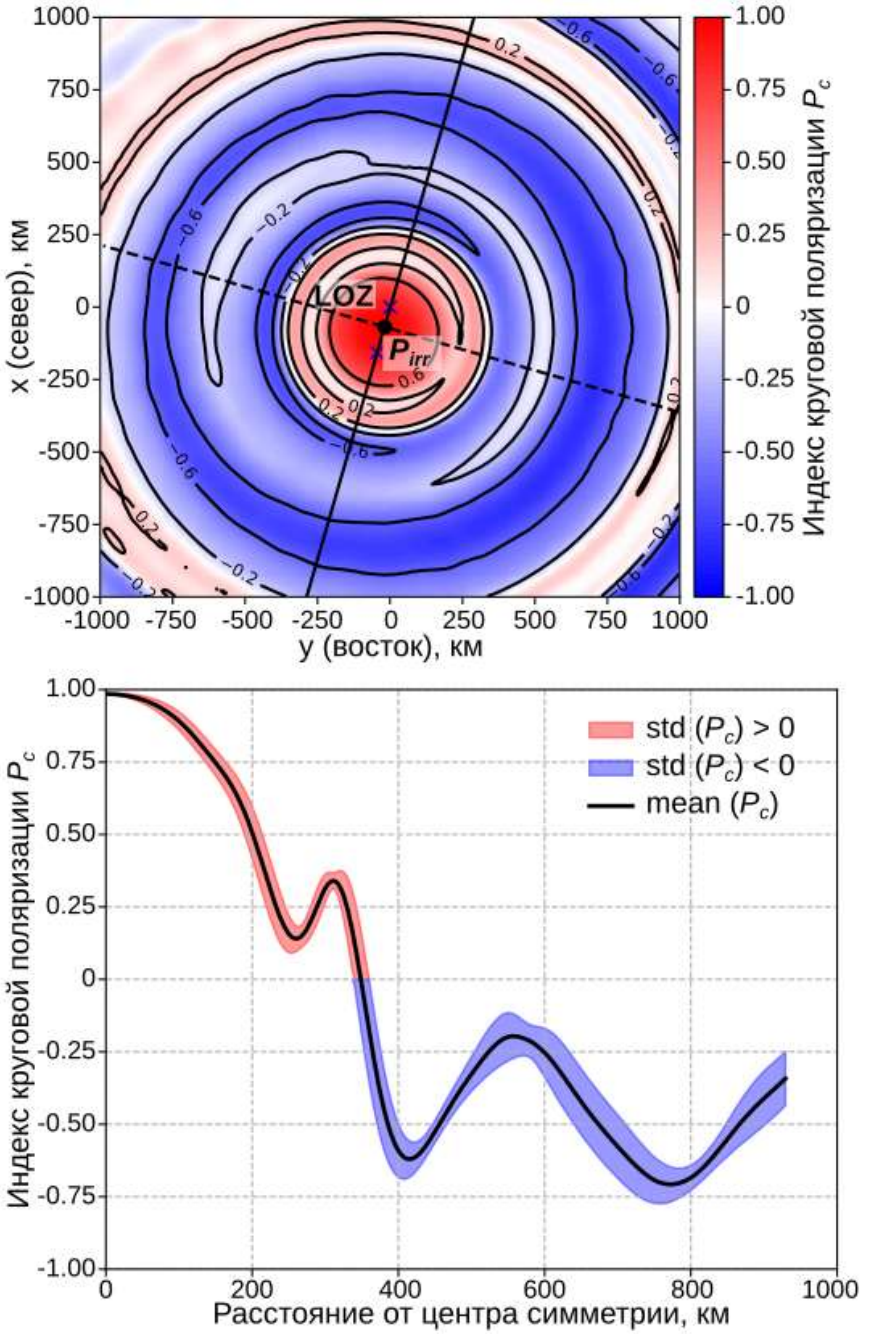


Рис. 4. Вверху *- распределение индекса круговой поляризации P_c на земной поверхности. Точка с координатами (0, 0) соответствует положению обс. Ловозеро; точка P_{irr} – проекция пересечения силовой линии магнитного поля с областью ионосферных неоднородностей. Сплошная линия совпадает с проекцией силовой линии, штриховая – ортогональна ей.* ***Внизу*** *- зависимость P_c от удаления от центра области засветки. Параметры численной модели: ионосфера № 1, h_{irr} = 800 км, σ = 50 км*

Результаты моделирования: φ_p

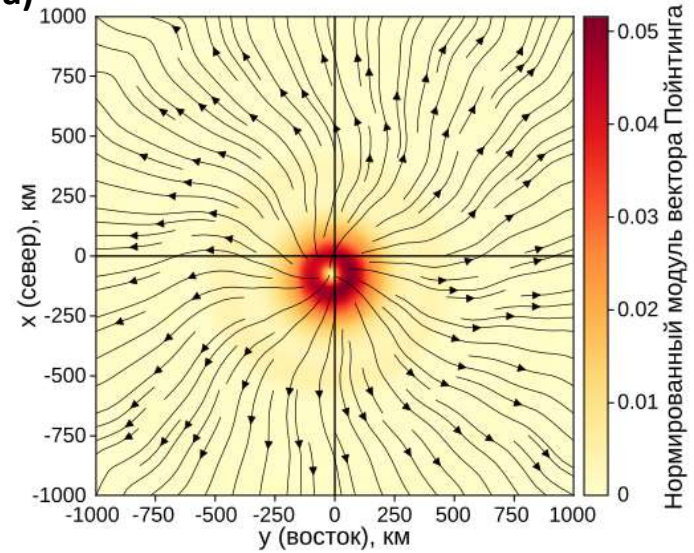
Для определения положения центра области засветки аврорального хисса необходимо не только определить расстояние до него, но и оценить направление на источник.

На рис. 5 (а) показано как изменяется азимутальный угол вектора Пойнтинга φ_p с удалением от центра области засветки. Величину отклонения φ_p от радиального (истинного) направления φ_r обозначим как $\Delta\varphi=\varphi_p-\varphi_r$. Ее пространственное распределение приведено на рис. 5 (б). Центр области на графике исключен из рассмотрения, поскольку в нем модуль вектора Пойнтинга стремится к нулю. Благодаря круговой симметрии, мы так же, как и в случае с индексом P_c, оценили среднее значение $\Delta\varphi$ в радиальном направлении от центра области засветки (рис. 5 (в)) и его среднеквадратическое отклонение. Как видно из рисунка, наибольшее отклонение от круговой симметрии наблюдается в ближней зоне - на расстояниях до 200 км от центра области засветки. В этой области среднеквадратическое отклонение $\Delta\varphi$ достигает 7°.

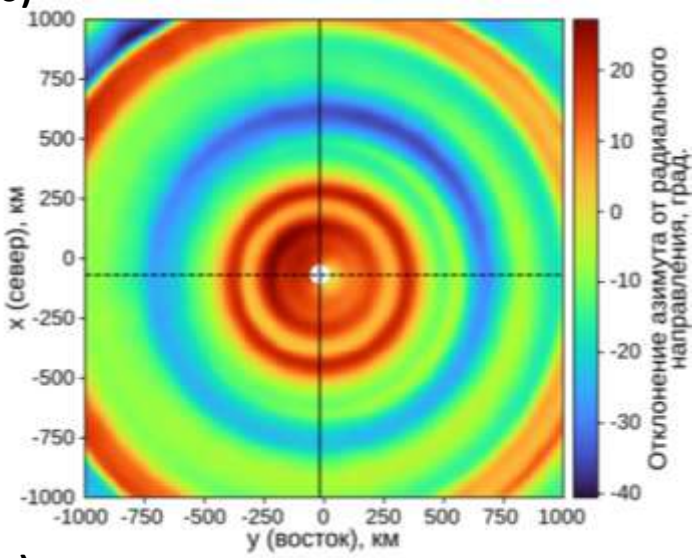
На расстояниях менее 430 км до центра области засветки φ_p имеет положительное смещение относительно истинного направления на центр (систематическая ошибка $\Delta\varphi > 0$). На удалениях свыше 430 км наблюдается отрицательное смещение ($\Delta\varphi < 0$). При этом минимальная погрешность определения направления (в пределах ±10°) наблюдается в интервале расстояний 400-500 км от центра.

Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что погрешность вычисления азимутального угла вектора Пойнтинга существенно зависит от расстояния до центра области засветки. Таким образом, предварительная оценка расстояния по индексу круговой поляризации P_c дает возможность для учета этой угловой ошибки.

а)



б)



в)

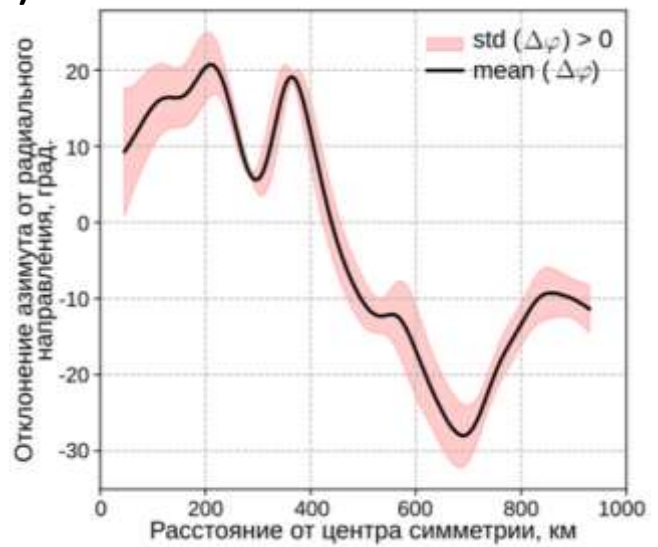


Рис. 5. а) *Цветом показано распределение модуля вектора Пойнтинга на земной поверхности, стрелками – его направление. Точка с координатами (0, 0) соответствует положению станции Ловозеро.* ***б)*** *Пространственное распределение отклонений значений азимутального угла вектора Пойнтинга от радиального направления - $\Delta\varphi$.* ***в)*** *Зависимость $\Delta\varphi$ от расстояния до центра области засветки. Параметры численной модели: ионосфера № 1, h_{irr} = 800 км, σ = 50 км*

Анализ влияния положения и размера области неоднородностей на P_c и $\Delta\varphi$

На рис. 6 представлены зависимости индекса круговой поляризации P_c и углового отклонения $\Delta\varphi$ от расстояния до центра области засветки для рассчитанных конфигураций пространственного положения области ионосферных неоднородностей.

Из рисунка видно, что варьирование положения области неоднородностей по высоте (400 и 800 км) практически не повлияло на результаты численного моделирования. По-видимому, это связано с тем, что при распространении рассеянных свистовых волн с этих высот геометрического расхождения уже практически не происходит. Данный диапазон высот относится к внешней ионосфере, где градиенты электронной концентрации относительно малы. Можно предположить, что при локализации области неоднородностей выше 1000-2000 км, на пространственную структуру поля существенное влияние начнет оказывать наклон силовых линий геомагнитного поля, что приведет к более заметному изменению геометрии волнового пучка.

В свою очередь, вариация параметра σ, определяющего поперечный размер области неоднородностей, приводит к значительным отличиям в оценках индекса P_c и углового отклонения $\Delta\varphi$. Чем меньше размер области неоднородностей, тем более выражены флуктуации характеристик. Тем не менее точка перехода с правой поляризации на левую для всех исследованных значений h_{irr} и σ стабильно локализована на расстоянии около 350 км от центра области засветки, а область минимальных значений $\Delta\varphi$ находится в интервале 400–500 км от центра. Обнаруженная устойчивость параметров P_c и $\Delta\varphi$ подтверждает возможность их использования для оценки координат центра области засветки.

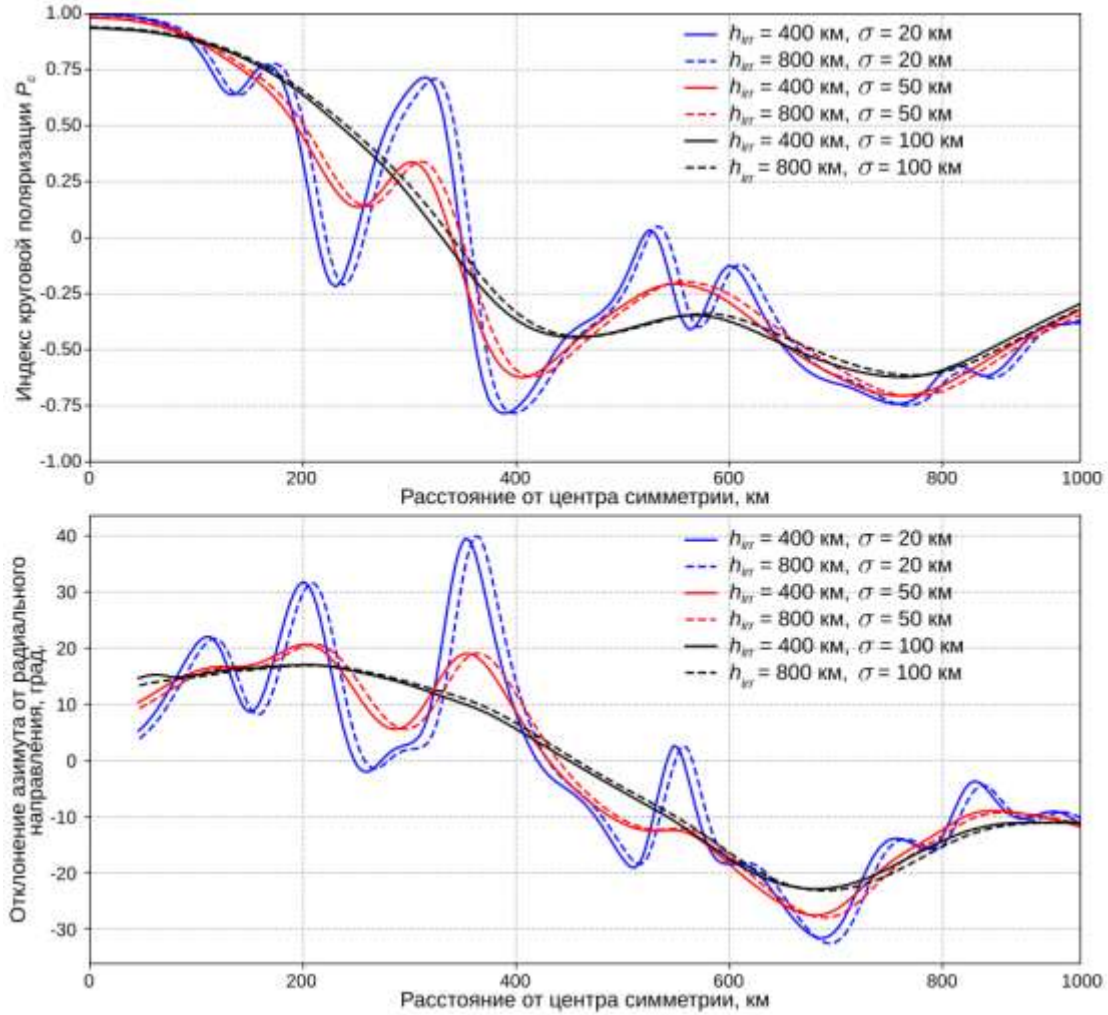


Рис. 6. *Зависимости P_c (**вверху**) и $\Delta\varphi$ (**внизу**) от расстояния до центра области засветки для ионосферы № 1 и следующих параметров области ионосферных неоднородностей: h_{irr} = 400 и 800 км над земной поверхностью, а σ = 20, 50 и 100 км*

Анализ влияния геомагнитной возмущенности ионосферы на P_c и $\Delta\varphi$

Влияние состояния ионосферы на исследуемые параметры P_c и $\Delta\varphi$ рассмотрено на примере фиксированной конфигурации области неоднородностей (h_{irr}=800 км, σ=50 км; см. рис. 7). В других вариантах модели области неоднородностей данные параметры ведут себя аналогично.

Из полученных модельных зависимостей следует, что изменение геомагнитных условий приводит к слегка отличающимся результатам. Данный факт обосновывает необходимость учета текущего состояния ионосферы при решении задачи оценки пространственного положения центра области засветки аврорального хисса.

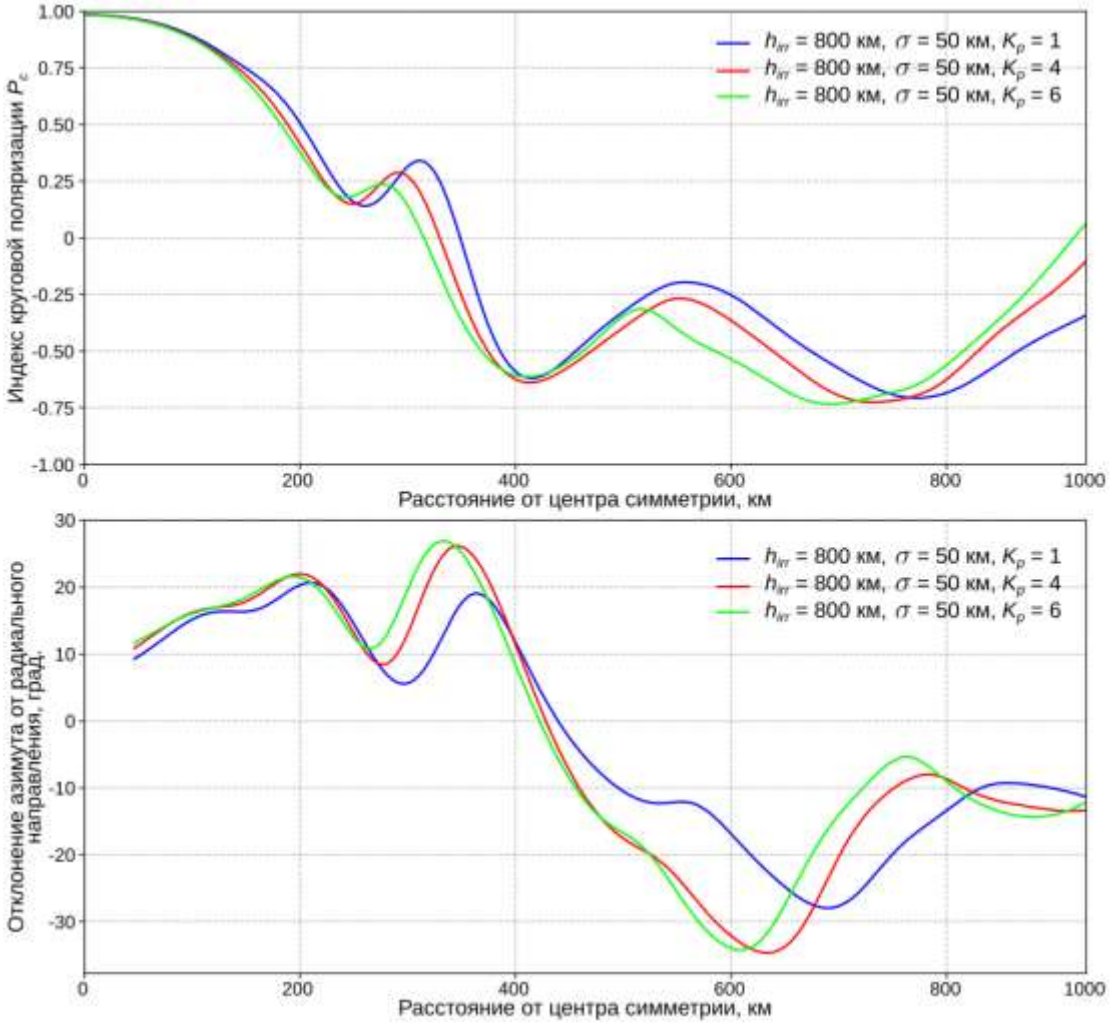


Рис. 7. *Зависимости P_c (**вверху**) и $\Delta\varphi$ (**внизу**) от расстояния до центра области засветки для трех ионосфер с K_p=1, 4, 6 и следующих параметров области ионосферных неоднородностей: h_{irr} = 800 км над земной поверхностью, σ = 50 км*

Пример аврорального хисса в обс. Ловозеро (LOZ) и обс. Баренцбург (BAB): 05 января 2019 г. 21:00 UT

Проанализирован случай аврорального хисса, зарегистрированного в обс. Ловозеро и Баренцбург 05 января 2019 г. в промежутке времени с 21:00 до 22:00 UT (индекс K_p=2). Этот случай описан в работе [Никитенко и др., 2024]. В статье рассматривались всплески хисса, которые возникали сначала в авроральных широтах в обс. Ловозеро (LOZ), а затем несколькими минутами позже в более высоких широтах в обс. Баренцбург (BAB). Сделаны выводы, что область засветки хиссом земной поверхности сначала находилась вблизи LOZ, а затем сместилась на более высокие широты.

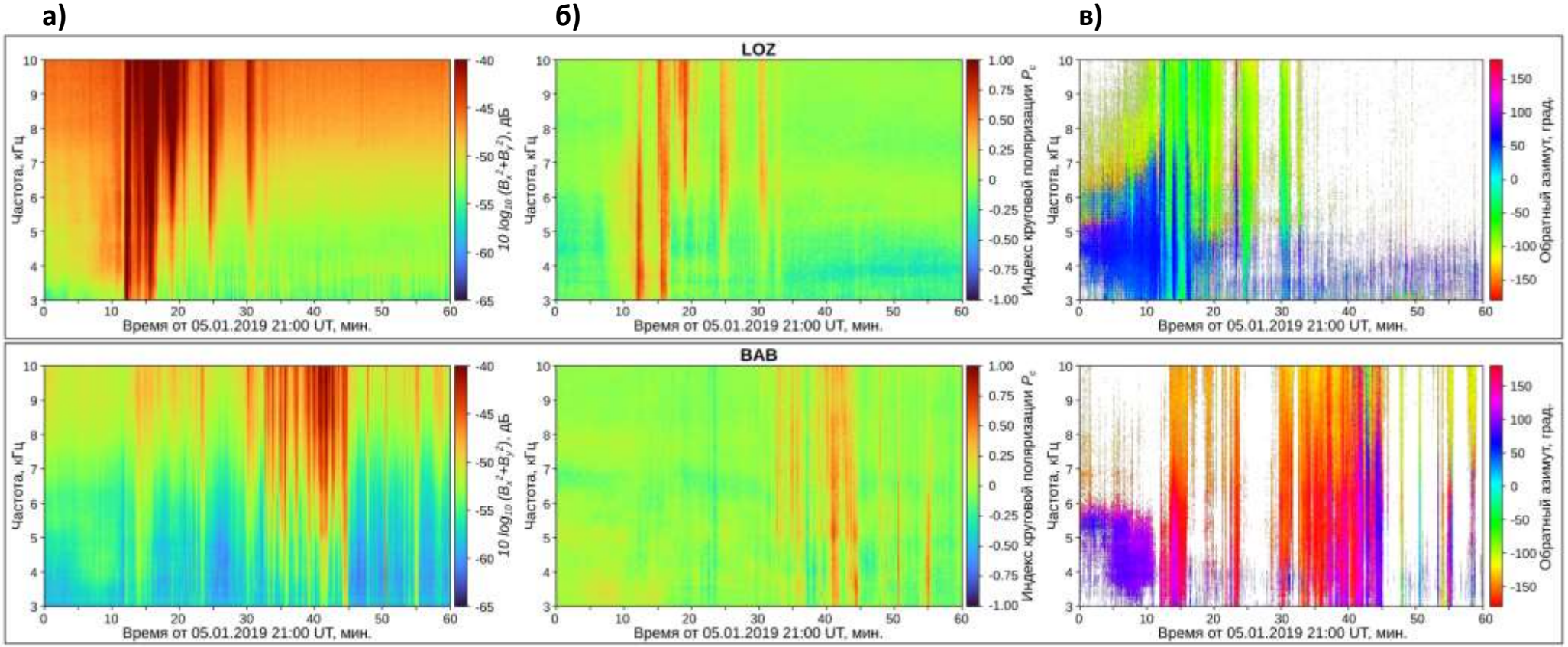


Рис. 8. *Зависимости от времени и частоты* ***(а)*** *спектральной плотности мощности горизонтальной компоненты магнитного поля и усредненных по времени значений* ***(б)*** *индекса круговой поляризации P_c и* ***(в)*** *углов φ_p, указывающих направление на источник аврорального хисса.* ***Вверху*** *– для обс. Ловозеро,* ***внизу*** *– для обс. Баренцбург*

Никитенко А.С., Клейменова Н.Г., Федоренко Ю.В., Бекетова Е.Б. Наземные наблюдения ОНЧ аврорального хисса в обсерваториях «Ловозеро» и «Баренцбург». Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10, No 4. С. 41–50. DOI: 10.12737/szf-104202405.

Результаты оценки положения центра области засветки аврорального хисса

Мы выделили наиболее мощные всплески хисса и оценили для них индекс круговой поляризации P_c и углы φ_p, указывающие направление на источник аврорального хисса, - обратный азимут (back-azimuth). Данные углы обратны азимутальным углам вектора Пойнтинга и отсчитываются от направления на север по часовой стрелке.

Как видно из рис. 9 (вверху), в первые полчаса регистрируются мощные всплески аврорального хисса в LOZ, обладающие правой поляризацией. Индекс P_c здесь в основном варьируется от 0.07 до 0.49. В то же время на станции BAB регистрируются очень слабые всплески хисса (не более чем на 1 дБ превышающие уровень шума), обладающие левой поляризацией порядка -0.04 с минимумом (-0.11) на 23й минуте. В следующие полчаса хисс регистрируется только в BAB и обладает правой поляризацией (индекс P_c изменяется от 0.06 до 0.35).

По результатам анализа оценок индекса круговой поляризации в LOZ выделяются два кластера значений: 1) P_c>0.2, 2) P_c<0.11. Данное разделение свидетельствует о пространственной неоднородности источника излучения и указывает на одновременное существование как минимум двух областей засветки аврорального хисса. Аналогичная закономерность выявляется и для BAB, где также выделяются два характерных диапазона: 1) P_c>0.5, 2) P_c<0.1. Здесь преобладание левой, близкой к линейной, поляризации указывает на существенное пространственное удаление точки регистрации от центра области засветки хисса.

На рис. 9 (внизу) представлены усредненные за минуту оценки углов φ_p. Видно, что направление прихода хисса в обе обсерватории в течение анализируемого интервала времени меняется слабо и имеет близкий к хаотическому характер. Для LOZ основной диапазон вариаций углов φ_p заключен в пределах от 260° до 280°, а для BAB – от 205° до 225°. Наблюдаемый разброс значений, по-видимому, обусловлен действием двух факторов. С одной стороны, он связан с особенностями пространственного распределения отдельных всплесков хисса в области его генерации и рассеяния, а также со смещением этих областей во времени. С другой стороны, данный разброс может быть вызван неполной фильтрацией мощных атмосфериков при предварительной обработке компонент электромагнитного поля. В условиях малого отношения сигнал/шум регистрируемого хисса атмосферики способны вызывать существенное смещение в распределении оцениваемых углов прихода.

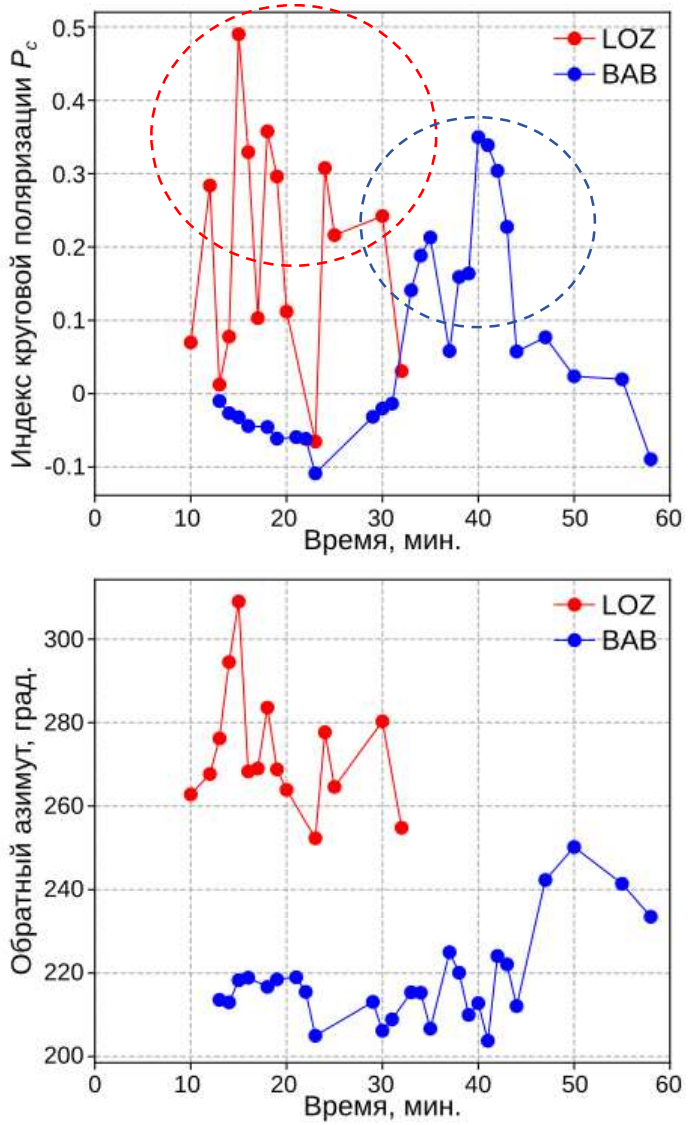
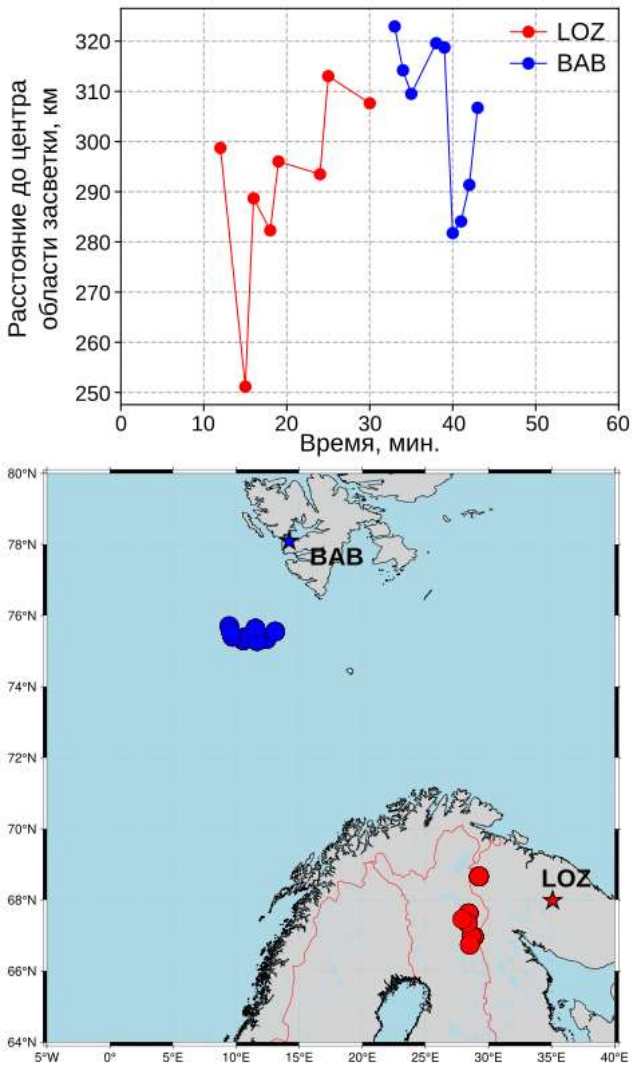


Рис. 9. *Зависимости P_c (**вверху**) и $\Delta\varphi$ (**внизу**) от времени для всплесков аврорального хисса 05.01.2019 с 21:00 до 22:00 UT в LOZ и BAB*

Результаты оценки положения центра области засветки аврорального хисса



Отметим, что для тех всплесков аврорального хисса, в которых преобладает левая, близкая к линейной, поляризация, корректное определение расстояния до центра области засветки становится невозможным вследствие резкого увеличения количества возможных решений. Это связано как со стремлением поляризации хисса к линейной на больших расстояниях от источника, так и с естественным падением интенсивности хисса с расстоянием, из-за чего регистрируемые сигналы имеют поляризацию, контролируемую шумом. Для хисса с левой поляризацией существует возможность оценить расстояние до источника в тех случаях, когда в экспериментальных данных явно прослеживается переход с правой на левую поляризацию (или наоборот) по другим косвенным признакам. Однако в рассматриваемом событии подобная динамика не наблюдается. Поэтому пространственные положения центров областей засветки волновода в данном случае оценивались исключительно по всплескам хисса, обладающим устойчивой правой круговой поляризацией.

На рис. 10 показаны результаты оценки возможных положений центров областей засветки, полученные с помощью численной модели со следующими параметрами области неоднородностей: h_{irr}=800 км, σ=100 км. При таком выборе значения параметра σ исключались избыточные вариации оцениваемых в модели параметров P_c и $\Delta\varphi$ (см. слайд 9), что дало возможность упростить поиск решения. Азимутальный угол корректировался в соответствии с результатами моделирования. Расчет проведен для каждой станции с учетом локальных параметров, соответствующих времени рассматриваемого события: величины и направления магнитного поля (модель Н.А. Цыганенко), а также концентрации электронов (IRI-2020).

Из анализа полученных данных следует, что возможные центры областей засветки хисса для обс. Ловозеро и Баренцбург расположены на значительном расстоянии друг от друга. При этом наблюдается тенденция к смещению области засветки в окрестности обс. Ловозеро с юга на север, в то время как в окрестности обс. Баренцбург смещение происходит преимущественно с запада на восток. По всей видимости, мы здесь наблюдаем поведение двух независимых источников аврорального хисса. Согласно модельным оценкам, один из них расположен западнее LOZ на расстоянии порядка 280 км, а второй – юго-западнее BAB на расстоянии порядка 310 км.

***Рис. 10. Вверху** - временные зависимости возможных расстояний от обсерваторий LOZ и BAB до центров областей засветки. **Внизу** - карта с указанием возможных положений центров областей засветки (отмечены кружками) для выбранных всплесков хисса*

Выводы

Представлена методика оценки пространственного положения центра области засветки земной поверхности авроральным хиссом. Она основана на результатах численного моделирования процессов генерации и распространения аврорального хисса к земной поверхности в условиях ионосферы, возмущенной высыпаниями высокоэнергичных электронов, с помощью полного решения волнового уравнения в плоскослоистой среде. Предполагалось, что генерация обусловлена электронами с энергиями, соответствующими возрастающей части типового распределения авроральных электронов (от 1 до 2.7 кэВ). Распределение высот, на которых происходит генерация волн, из общих соображений предполагалось равномерным в диапазоне от 2100 до 20000 км. Для расчета концентраций электронов и ионов использовалась модель IRI-2020. Моделирование проводилось для частоты волны 8 кГц. Результаты моделирования показали, что рассеяние аврорального хисса при определенных условиях (повышенных энергиях авроральных электронов) может происходить на неоднородностях F-слоя ионосферы, расположенных ниже 1000 км. Исходя из этого, для исследования пространственного распределения полей рассеянных волн на земной поверхности были выбраны следующие параметры области ионосферных неоднородностей: 1) высота h_{irr}, на которой происходит рассеяние, - 400 и 800 км; 2) характерный поперечный размер области σ - 20, 50 и 100 км.

На основе результатов расчета компонент электромагнитного поля (H_x, H_y, E_z) аврорального хисса оценено пространственное распределение индекса круговой поляризации P_c и направление вектора Пойнтинга φ. Показано, что P_c обладает круговой симметрией, что позволяет оценивать изменение индекса круговой поляризации в радиальном направлении. Выявлено, что по мере удаления от центра области засветки поляризация изменяется на расстоянии порядка 350 км с правой ($P_c > 0$) на левую ($P_c < 0$). В то же время обнаружено, что погрешность вычисления φ существенно зависит от расстояния до центра области засветки. Предварительная оценка расстояния по индексу круговой поляризации P_c дает возможность учета этой угловой ошибки $\Delta\varphi$.

Показано, что варьирование положения области неоднородностей по высоте практически не влияет на результаты численного моделирования. По-видимому, это связано с тем, что при распространении рассеянных свистовых волн с выбранных высот 400 и 800 км вклад геометрического расхождения мал. Вариация параметра σ приводит к значительным отличиям в оценках значений P_c и $\Delta\varphi$. Тем не менее граница перехода с правой поляризации на левую для всех исследованных значений h_{irr} и σ стабильно локализована на расстоянии около 350 км от центра области засветки, а область минимальных значений $\Delta\varphi$ находится в интервале 400–500 км от центра. Обнаруженная устойчивость параметров P_c и $\Delta\varphi$ подтверждает возможность их использования для оценки координат центра области засветки.

Для демонстрации возможности оценки пространственного положения центра области засветки земной поверхности авроральным хиссом представленная в данной работе методика применена при анализе всплесков аврорального хисса в обс. Ловозеро и Баренцбург 05 января 2019 г. в 21:00 UT. Установлено, что возможные центры областей засветки хисса для обс. Ловозеро и Баренцбург расположены на значительном расстоянии друг от друга. При этом наблюдается тенденция к смещению области засветки в окрестности обс. Ловозеро с юга на север, в то время как в окрестности обс. Баренцбург смещение происходит преимущественно с запада на восток. Полученные результаты свидетельствуют в пользу существования двух независимых источников аврорального хисса, один из них расположен западнее обс. Ловозеро на расстоянии порядка 280 км, а второй – юго-западнее обс. Баренцбург на расстоянии порядка 310 км.