

ЕРМАКОВА Елена Николаевна
ПОЛЯКОВ Сергей Владимирович
КОТИК Дмитрий Самойлович

Препринт № 531

Исследование спектральных структур в фоновом
ультранизкочастотном шуме на разных широтах

Исследование спектральных структур в фоновом
ультранизкочастотном шуме на разных широтах

Е.Н. Ермакова
С.В. Поляков
Д.С. Котик

Подписано в печать 18.12.2009 г. Формат 60×90/16.
Бумага писчая. Усл. п. л. 2.
Тираж 50. Заказ 5593

Отпечатано в ФГНУ НИРФИ
603950, г. Нижний Новгород, ул. Б.Печерская, 25/12а

Нижний Новгород
2009

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ СТРУКТУР В ФОНОВОМ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНОМ ШУМЕ НА РАЗНЫХ ШИРОТАХ // Препринт №531. – Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ, 2009. – 24 с.

УДК 550.383

Выполнены численные расчеты магнитных тангенциальных компонент в частотном диапазоне 0.1-15 Гц для приемных пунктов, расположенных на различных географических широтах. Для расчетов использовано решение задачи о возбуждении полости Земля–ионосфера, неоднородная анизотропная, наземным источником типа вертикальный электрический диполь. Расчеты проводились для различных численных и аналитических модельных профилей ионосферных параметров. Выполнено сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований резонансной структуры спектра на станциях о. Крит ($35,15^{\circ}$ N, $25,20^{\circ}$ E), п.п. Новая Жизнь Нижегородской области ($55,97^{\circ}$ N, $45,74^{\circ}$ E), Ловозеро (68° N, 35° E) и Баренцбург ($78,09^{\circ}$ N, $14,12^{\circ}$ E.). По результатам сравнения теоретических и экспериментальных спектров выявлена степень соответствия различных модельных профилей реально существующим. Исследования дополнены также анализом расчетных и экспериментальных спектров поляризованного параметра магнитного шума.

8. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В. Исследование особенностей резонансной структуры спектра фонового шума в диапазоне частот 1-10 Гц с учетом наклона магнитного поля Земли. // Изв. вузов, Радиофизика. 2008. Т.51, №7. С.575-584.
9. Собчаков Л. А., Поляков С. В., Астахова Н. Л. Возбуждение электромагнитных волн в плоском волноводе с анизотропной верхней стенкой. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т.46, №12. С.1503-1510.
10. Ermakova E. N., Kotik D. S., Semenova N. V., Popova T. A. A study of the local and global properties of the spectral resonance structure of the ULF magnetic noise on the basis of measurements in two points separated more than 1000 km // "Physics of Auroral Phenomena". Proc XXXI Annual Seminar, Apatity, 2008. P.141-145.
11. Böisinger T., Ermakova E. N., Haldoupis C., Kotik D. S. Magnetic-inclination effects in the spectral resonance structure of the ionospheric Alfvén resonator. // Annales. Geophysicae, 2009, V.27, P.1313-1320.
12. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Поляков С. В., Щенников А. В. О механизме формирования широкополосного максимума в спектре фонового шума на частотах 2-6 Гц. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т.50, №7. С.607-623.

- диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. // Докл. АН СССР. 1987. Т.297. С.840-843.
2. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. Теория формирования резонансной структуры атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций. // Изв. вузов Радиофизика. 1989. Т.32, №7. С.802.
 3. Belyaev P. P., Bosinger T., Isaev S. V., Trakhtengerts V. Yu., and Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. 1999. V.104. P.4305.
 4. Bösinger T., Haldoupis C., Belyaev P. P., Yakunin M. N., Semenova N. V., Demekhov A. G., Angelopoulos V. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low latitude station ($L = 1.3$) // J. Geophys. Res. A. 2002. V.107, No.10. P.1281. doi:10.1029/2001JA005076, 2002.
 5. Bösinger T., Demekhov A. G., Trakhtengerts V. Yu. Fine structure in ionospheric Alfvén resonator spectra observed at low latitude ($L = 1.3$) // Geophys. Res. Lett. 2004. V.31. Art. no. L18802. doi:10.1029/2004GL020777, 2004.
 6. Semenova N. V. and Yahnin A. G. Diurnal behaviour of the ionospheric Alfvén resonator signatures as observed at high latitude observatory Barentsburg ($L=15$) // Ann. Geophys., 26, 2245–2251, 2008.
 7. Reinisch B. W., Nsumei P., Huang X., Bilitza D. K. Modeling the F2 topside and plasmasphere for IRI using IMAGE/RPI and ISIS data // Advances in Space Research, 39(2007) 731-738.

1. Введение

Впервые резонансная структура спектра (РСС) фонового низкочастотного шума была обнаружена на среднеширотном пункте «Новая Жизнь» ($55,97^{\circ}\text{N}$, $45,74^{\circ}\text{E}$) [1, 2]. Существование резонансной структуры связано с влиянием ионосферного альвеновского резонатора на распространение низкочастотных полей (диапазон частот 1–10 Гц) в полости земля-ионосфера и проявляется в глубокой гармонической модуляции спектров параметров приземного магнитного шума. Позднее РСС была обнаружена и тщательно исследована в полярных (Sodankyla, Финляндия: $67,4^{\circ}\text{N}$, $26,5^{\circ}\text{E}$) [3], низких (о. Крит, Греция: $35,15^{\circ}\text{N}$, $25,20^{\circ}\text{E}$) [4, 5] и высоких широтах (Баренцбург: $78,09^{\circ}\text{N}$, $14,12^{\circ}\text{E}$) [6]. Уже в первых работах было отмечено, что РСС зависит от локальных свойств ионосферы над точкой приема. Поэтому возможно развитие методов диагностики ионосферных параметров, прежде всего концентрации заряженных частиц по измерениям спектров фонового шума в диапазоне (0,1–15) Гц и сопоставлению их с расчетными спектрами.

В настоящей работе будет выполнено теоретическое моделирование резонансных спектров для приемных пунктов разных широт с использованием различных модельных профилей электронной концентрации: International Reference Ionosphere – IRI-2001, двух аналитических моделей, задающих разный характер спадаания электронной

концентрации на высотах выше максимума F-слоя [7], и модели ионосферных параметров, построенной по измерениям радара некогерентного рассеяния в Свалбарде [6].

По сопоставлению результатов расчетов и наблюдений будут определены степень соответствия указанных моделей реальным профилям и характер необходимой корректировки данных модельных профилей.

Также проанализировано возможное влияние структуры суб-ИАР на спектры фонового ультранизкочастотного шума на высоких широтах. Выполнены численные расчеты поляризационного параметра (отношение право- к лево-поляризованной компоненте магнитного поля) для разных моделей. На основе анализа результатов расчетов поляризации и профилей показателей преломления показано, что структура суб-ИАР практически отсутствует для модели Свалбард радара, что подтверждается монотонным характером спектра поляризации. Сопоставление расчетов с экспериментальными спектрами поляризации подтверждает еще раз адекватность модели Свалбард радара.

2. Ионосферные модели, численные расчеты

В настоящей работе получила свое дальнейшее развитие методика модельных расчетов РСС, разработанная в [8]. Моделирование выполнялось для разных ионосферных моделей с разным характером спадания электронной концентрации выше максимума F-слоя и с разными по интенсивности E-слоями ионосферы. Это позволило по-новому интерпретировать особенности РСС более сложного

расчетных и экспериментальных спектров поляризационного параметра магнитного шума. Для станции Баренцбург мы имели возможность проанализировать результаты расчетов двух различных моделей и сравнить их с экспериментом. Было показано, что модель Свалбард радара наиболее адекватно описывает спектры магнитных компонент и поляризационного параметра. Однако все особенности наблюдаемой суточной зависимости вероятности появления РСС на станции Баренцбург (практически полной отсутствие резонансной структуры в период околополуденных часов), невозможно объяснить на основе усредненной модели Свалбард радара. Требуется корректировка указанной модели с учетом особенностей высотных профилей ионосферных параметров на высоких широтах, например, в периоды близости к дневному каспу. Для корректировки всех моделей было бы важным дополнить мониторинг магнитных КНЧ полей одновременными ионозондовыми или радарными измерениями.

Авторы благодарны А. Г. Яхнину за предоставленные данные по регистрации КНЧ шумов на станции Баренцбург.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты №№ 07-02-01189, 09-02-97035_p_поволжье_a.

Литература

1. Беляев П. П., Поляков С. В., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в

времени суток при падении низкочастотных волн на ионосферу снизу. При падении на ионосферу сверху РСС обнаруживается практически в любое время суток, и ее свойства слабо меняются в течение суток. Это говорит о том, что ИАР как структура, связанная с нарушением условий геометрической оптики для УНЧ волн, существует в любое время суток, но высокие значения показателей преломления в Е-слое, которые наблюдаются днем, мешают проникновению низкочастотных волн в верхние слои ионосферы. Таким образом, ухудшаются условия возбуждения ИАР при падении волн на ионосферу снизу.

Приведенные результаты моделирования спектров магнитных компонент и поляризационного параметра фонового шума и сопоставление их с экспериментом позволяют определять модели ионосферных параметров, наиболее адекватно описывающие результаты мониторинга шумовых полей. Такой анализ позволил сделать вывод о полном несоответствии профилей электронной концентрации, которые даются моделью IRI-2001 на низких (о. Крит) и высоких (Баренцбург) широтах. Сравнение результатов моделирования и эксперимента позволили также выявить периоды для станции «Новая Жизнь», для которых численная модель IRI-2001 неадекватна: это весенне-осенние периоды в годы минимальной солнечной активности. Имеющимися аналитическими моделями, которые задаются функциями α -Charman и Vary-Charman, можно корректировать модели на высотах выше максимума F-слоя. Для корректировки модели IRI-2001 в нижних слоях ионосферы возможен анализ

характера и объяснить характер спектра поляризационного параметра фонового шума

При моделировании низкочастотных спектров мы пользовались решением задачи о возбуждении плоского волновода Земля-ионосфера с учетом наклона магнитного поля Земли, приведенным в работе [9]. При этом было принято, что источником шума в интересующем нас диапазоне частот являются вертикальные молниевые разряды (диполь $\vec{P} = \vec{l} \times \vec{l}'$), расположенные на расстоянии r от точки приема в плоском волноводе Земля – ионосфера толщиной h . Ионосфера считается плоскостистой, неоднородной в вертикальном направлении и гиротропной. Магнитное поле Земли лежит в плоскости ZY и составляет угол θ с вертикалью.

Выполним далее расчеты магнитных компонент для ионосферных параметров, характерных для низких (о. Крит), средних (п.п. «Новая Жизнь»), авроральных (п.п. Ловозеро) и высоких широт (п.п. Баренцбург). В наших расчетах мы будем использовать разные модели электронной концентрации на высотах выше максимума F-слоя: IRI-2001 и две аналитические модели, аппроксимирующие профили функциями α -Charman и Vary-Charman [7]. Согласно работе [7], зависимость электронной концентрации от высоты для этих моделей задается следующим выражением:

$$N(h) = N_m \left(\frac{H_m}{H(h)} \right)^{1/2} \exp \frac{1}{2} \{1 - y(h) - \exp[-y(h)]\} \quad (1)$$

где
$$y(h) = \int_{h_m}^h \frac{dh}{H(h)}, \quad H(h) = H + \frac{H_m - H_T}{\tanh(\beta)} \tanh\left(\beta \frac{h - h_T}{h_m - h_T}\right).$$

Здесь N_m , h_m , и H_m – электронная концентрация, высота и характерный масштаб изменения N_e в максимуме F-слоя. Для α -Чарпан функции $H(h) = Hm = \text{const}$. Параметр $h = h_T$ определяется высотой, где доминирующие ионы меняются с O^+ на H^+ . Для определения основных параметров для максимума F-слоя мы пользовались данными модели IRI-2001. Рисунок 1 демонстрирует разный характер спада N_e с высотой: плавный – для IRI модели и наиболее резкий – для α -Чарпан функции:

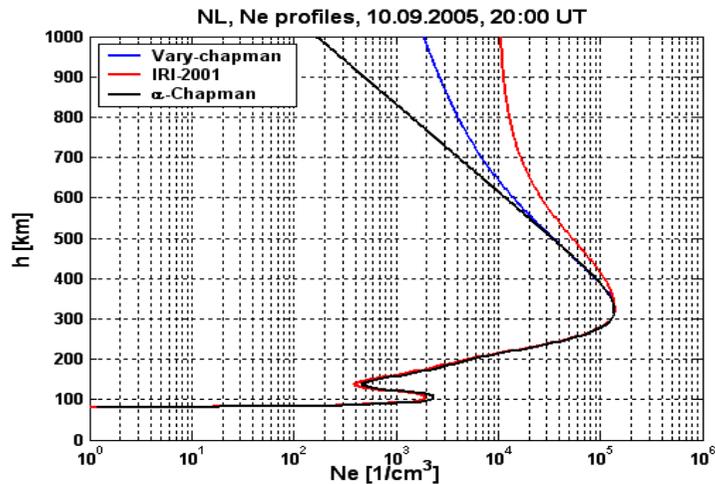


Рис.1 – Профили электронной концентрации для различных ионосферных моделей.

Приведем результаты моделирования спектров параметра поляризации \mathcal{E} для высокоширотного пункта Баренцбург с использованием модели IRI-2001 и Свалбард радара. Как видно из рисунка 1, частотная зависимость \mathcal{E} имеет более монотонную зависимость и это связано с отсутствием ярко выраженной долины в профилях показателей преломления (см. рисунок 7).

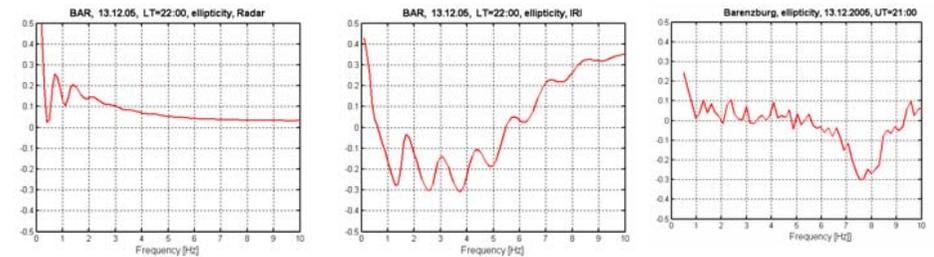


Рис.12 – Спектры параметра \mathcal{E} для станции Баренцбург: слева – модель Свалбард радара, в центре модель IRI-2001, справа экспериментальный спектр.

Полученная теоретическая кривая для модели радара адекватно описывает наблюдаемые спектры параметра поляризации в Баренцбурге, которые имеют слабую частотную зависимость: параметр \mathcal{E} близок к 0 практически для всех частот до первого Шумановского резонанса.

3. Обсуждение, выводы.

Сравнительный анализ расчетных спектрограмм, полученных в [6] и в настоящей работе, обнаруживает более сильную зависимость глубины резонансных осцилляций от

наблюдается редко, обычно 1-2 часа сразу после захода солнца. Также спектры поляризационного параметра сильно зависят от времени суток [12].

На рисунке 11 приведены экспериментальные и расчетные спектры параметра \mathcal{E} для модели IRI-2001, которые в качественном плане правильно отражают временную динамику этого параметра.

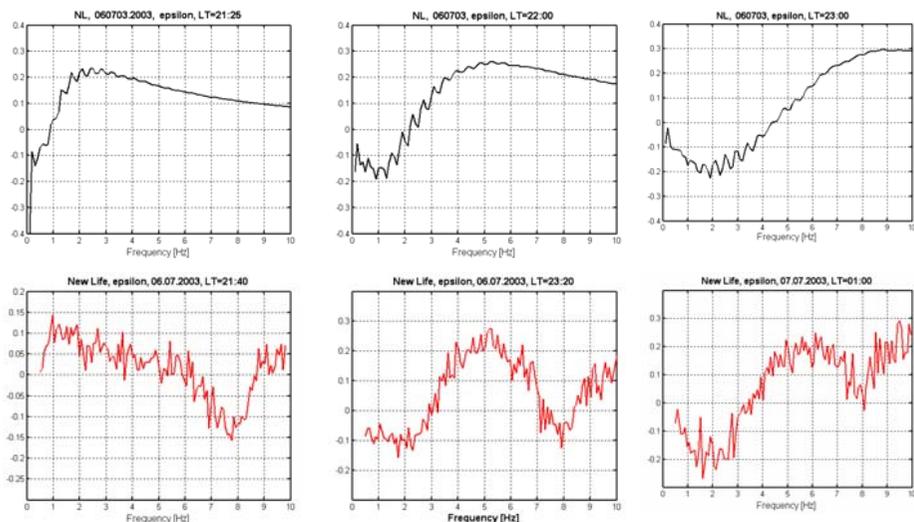


Рис. 11 – Временная динамика спектров параметра \mathcal{E} для периода 06.07.03, верхняя панель – расчетные спектры (при расчетах не учитывалось влияние Шумановского резонанса).

Однако для получения количественных совпадений необходима существенная корректировка этой модели. Это возможно при проведении одновременной регистрации фонового шума и, например, ионзондовых измерений ионосферы над точкой регистрации низкочастотных полей.

На рисунке 2 представлены результаты расчетов для о. Крит. Расчеты выполнены для магнитных компонент и поляризационного параметра $\mathcal{E} = \frac{|H_R|/|H_L| - 1}{|H_R|/|H_L| + 1}$ для модели IRI-2001. Здесь $H_R = (H_{CIO} + iH_{B3})/\sqrt{2}$, $H_L = (H_{CIO} - iH_{B3})/\sqrt{2}$. Для моделирования выбраны периоды, для которых в работах [4, 5] приведены экспериментальные спектры поляризационного параметра.

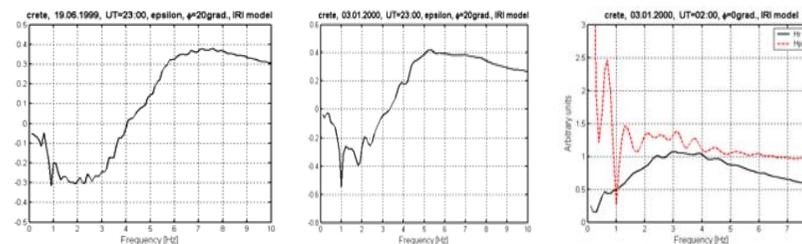


Рис.2 – Расчетные спектры поляризационного параметра (левый и центральный графики) и магнитных компонент для о. Крит с использованием модели IRI-2001.

Как видно из рисунка 2, расчеты дают резонансные осцилляции с очень малой амплитудой и в частотном диапазоне, существенно меньшем (до 3 Гц), чем наблюдаются в эксперименте.

Также результаты моделирования с использованием IRI-2001 для широт о. Крит не могут объяснить более сложный характер резонансных спектров, наблюдаемых в этом приемном пункте. На следующем рисунке представлены

результаты расчетов для более резкого характера спада магнитных компонент на высотах выше максимума F-слоя, задаваемого функциями α -Chapman и Vary-Chapman.

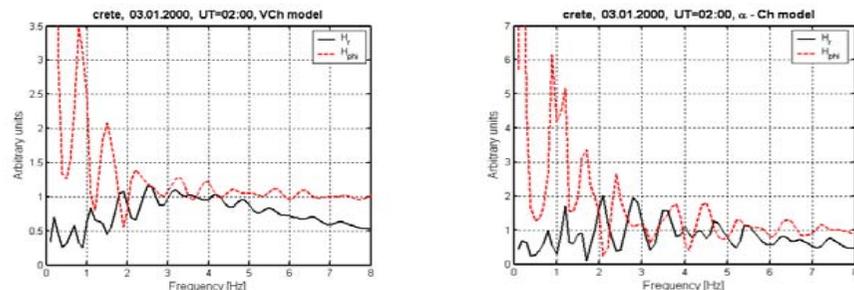


Рис.3 – Расчетные спектры магнитных компонент для о. Крит с использованием аналитических моделей α -Chapman и Vary-Chapman.

Как видно из рисунка 3 более резкий характер спада не только увеличивает глубину осцилляций и частотный интервал, в котором наблюдается РСС, но и меняет характер осцилляций, приводя к появлению дополнительных максимумов и неэквидистантности в резонансных структурах.

Такой характер спектров достаточно часто наблюдается в приемном пункте на о. Крит [12]. Таким образом, меняя при моделировании характер спада концентрации заряженных частиц в ионосфере на высотах выше максимума F-слоя, мы можем выбрать модельные профили, наиболее адекватно описывающие характер резонансных структур, наблюдаемых в эксперименте.

магнитных компонент сильно смещается в сторону частоты первого Шумановского резонанса и расплывается, и его тяжело зарегистрировать в эксперименте. Удобнее в таких случаях анализировать спектры поляризационного параметра.

На рисунке 10 приведены спектры поляризационного параметра, построенные по измерениям магнитных компонент шума на станции «Новая Жизнь» в разные периоды солнечной активности.

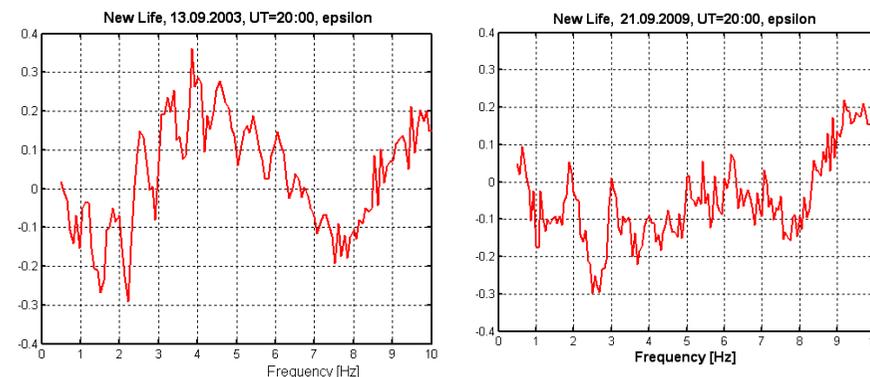


Рис.10 – Спектры поляризационного параметра на станции «Новая Жизнь» для разных периодов солнечной активности: слева – год выхода солнечной активности из максимума, справа - год минимальной солнечной активности.

Анализ данных мониторинга шума показал, что спектры поляризационного параметра в годы минимума имеют характер более плавных осцилляций, чем в годы максимальной активности Солнца, с меньшими абсолютными значениями ϵ в темное время суток. Широкополосный максимум в амплитудах компонент в эти периоды

определяется существенно больший диапазон частот, в котором присутствуют резонансные осцилляции для IRI-2001 модели. Слабая зависимость указанных профилей от времени суток на высотах ИАР приводит к малому наклону резонансных линий для модели, построенной по измерениям радара в Свалбарде. Такой же характер РСС наблюдается и в эксперименте [6].

Таким образом, эта модель более адекватно описывает наблюдаемые особенности РСС на станции Баренцбург.

Выполним теперь численные расчеты для спектров параметра поляризации для станций «Новая Жизнь» и Баренцбург. Как известно из [12], этот параметр очень чувствителен к состоянию ионосферы на нижних высотах до максимума F-слоя и полностью определяется характером профилей ионосферных параметров, а, следовательно, и профилем показателей преломления низкочастотных волн на этих высотах. Анализ спектров именно этого параметра для исследования влияния ионосферной структуры суб-ИАР удобен еще и потому, что, являясь отношением магнитных компонент, параметр Э свободен от влияния частотной зависимости интенсивности источников низкочастотных излучений в КНЧ диапазоне и от особенностей амплитудно-частотной характеристики магнитных датчиков. Этот параметр, как показывают численные расчеты, слабо зависит от направления на источник. Как следует из [12], при уменьшении оптической толщины нижних слоев ионосферы, широкополосный спектральный максимум в амплитудах

На следующем рисунке представлены результаты расчетов магнитных компонент для разных моделей для среднеширотного пункта «Новая Жизнь», выбраны разные направления на источник.

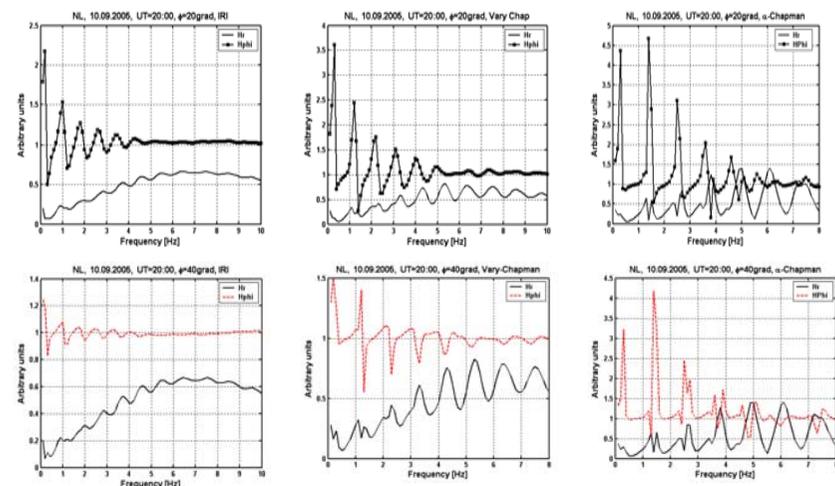


Рис. 4 – Результаты численных расчетов магнитных компонент для п.п. «Новая Жизнь» для разных модельных профилей для углов

$$\varphi = 20^{\circ} \text{ (верхняя панель) и } \varphi = 40^{\circ} \text{ (нижняя панель);}$$

φ - угол между направлением на источник и направлением, перпендикулярным к плоскости магнитного меридиана.

Как видно из рисунка 4, разный характер спада N_e , также как и для о. Крит, приводит не только к изменению глубины осцилляций, но и к изменению характера самих спектров: при более резком уменьшении концентрации усложняется характер спектров, появляются дополнительные максимумы, причем отличие от квазигармонических

осцилляций усиливается при направлениях на источник, близких к $\varphi = 45^\circ$. Как следует из рисунка 5 и [10] в осенне-весенние периоды для среднеширотного пункта «Новая Жизнь» достаточно часто наблюдается сложный характер резонансных структур: появление дополнительных максимумов и зависимость периода осцилляций от частоты.

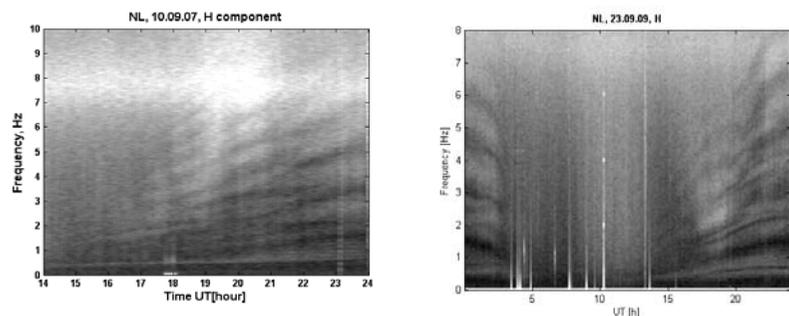
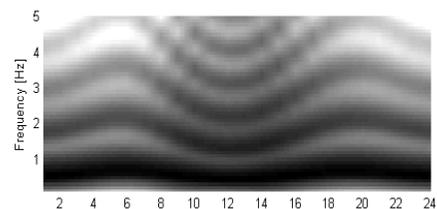


Рис. 5 – Спектрограммы магнитной компоненты север-юг, демонстрирующие сложный характер РСС, наблюдаемой в «Новой Жизни» в осенний период.

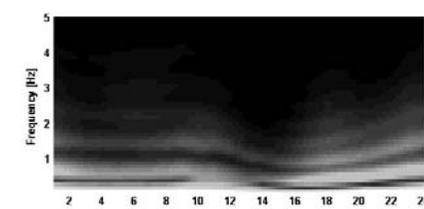
Как показывают результаты моделирования, приведенные на рисунке 4, такие сложные РСС невозможно получить для модели IRI-2001. Таким образом, можно сделать вывод, что профили электронной концентрации над этим пунктом в весенне-осенние периоды в годы минимальной солнечной активности должны иметь более резкий характер спада, чем мы имеем для IRI модели. Для указанных периодов эта модель нуждается в существенной корректировке.

особенностями высотных профилей показателей преломления низкочастотных волн.

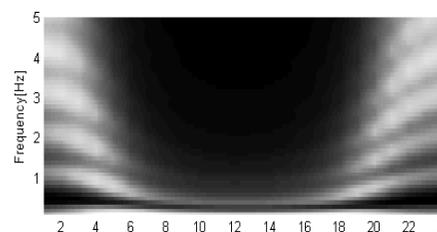
13.12.2005, IRI-2001



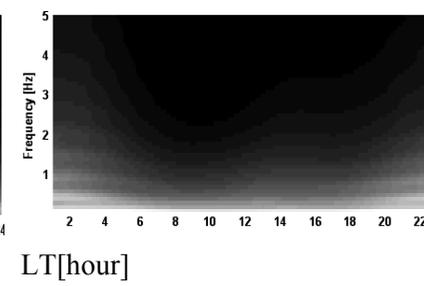
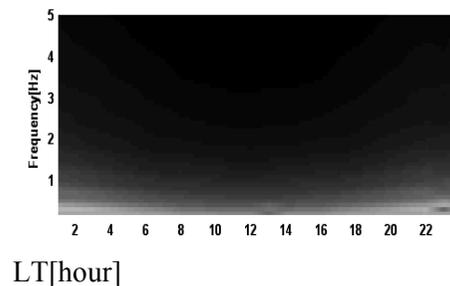
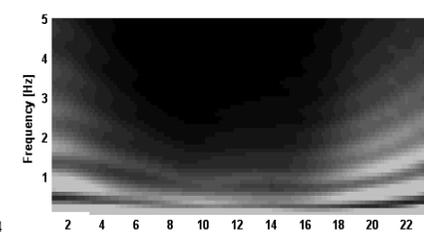
13.12.2005, Svalbard radar



22.03.2006



22.03.2006



LT[hour]

LT[hour]

Рис.9 – Спектрограммы компоненты Нг для модели IRI-2001 (слева), для модели Svalbard radar (справа)

Наличие долины и слабый E-слой приводят к уменьшению оптической толщины нижних слоев ионосферы и, в конечном счете, к уменьшению затухания и экранировки низкочастотных волн на высотах до максимума F-слоя. Этим

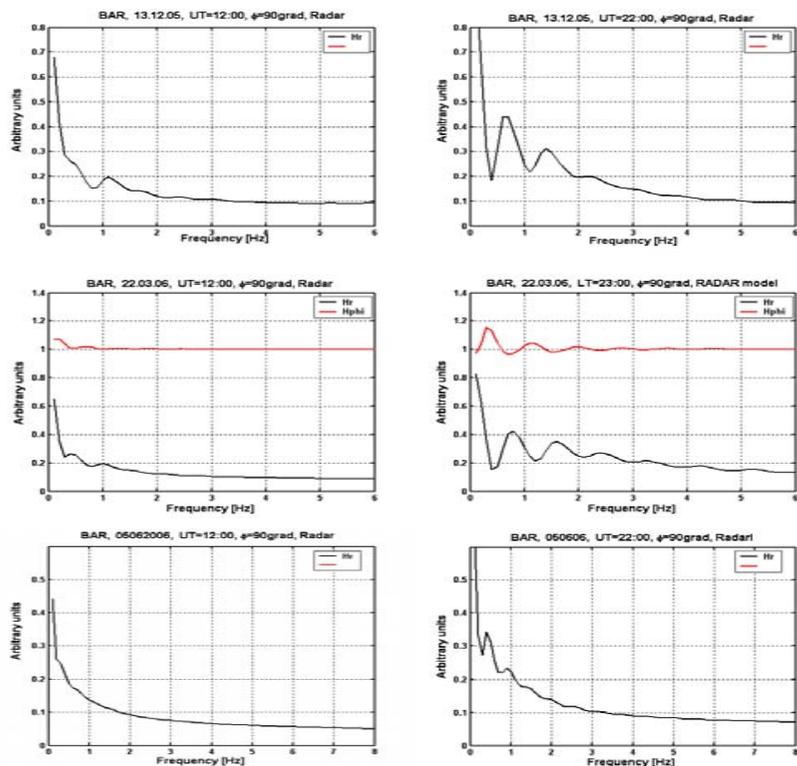


Рис.8 – Результаты численных расчетов магнитных компонент H_r (параллельна направлению на источник) и H_{ϕ} (перпендикулярна направлению на источник) для модели Свалбард радара.

Обнаруживается зависимость глубины осцилляций РСС от времени суток для всех сезонов. При этом глубина осцилляций наименьшая в период 12:00 UT. На рисунке 9 приведены спектрограммы резонансных структур, рассчитанные для различных моделей. Основные различия в суточном ходе РСС для разных моделей связаны с

На рисунке 6 представлены результаты расчета магнитных компонент для авроральной станции Ловозеро для разных моделей.

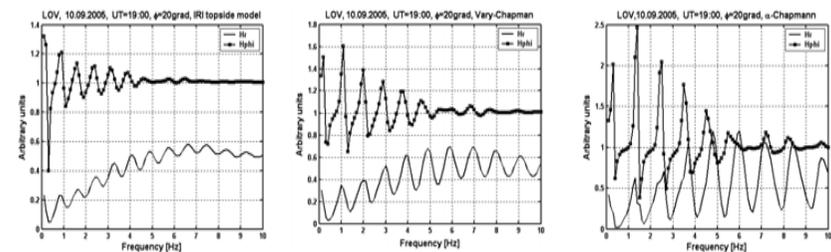


Рис. 6 – Результаты численных расчетов магнитных компонент для п.п. «Ловозеро» для разных модельных профилей.

Как видно из рисунка 6, характер осцилляций для авроральной станции не меняется существенно и остается квазигармоническим для разных модельных профилей. Выбор характера спада концентрации заряженных частиц может определяться в зависимости от частотного диапазона, в котором наблюдаются резонансные спектры. Как следует из [10] этот частотный интервал может существенно меняться, простираясь до частоты второго Шумановского резонанса.

Далее численные расчеты резонансных спектров были выполнены для станции Баренцбург, расположенной в высоких широтах. Расчеты выполнялись для модели IRI-2001 и модели, построенной по измерениям радара в Свалбарде (расположен вблизи приемного пункта Баренцбург.) Целью данных теоретических исследований была интерпретация результатов регистрации РСС в этом пункте, полученных в

[6], и сравнение с результатами расчетов, выполненных в этой же работе. Вычисления резонансных спектров в [6] выполнялись для падения низкочастотных волн на ионосферу сверху. Моделирование проведем для условий слабой геомагнитной активности ($A_p=15$) и минимума солнечной активности ($F10.7D=75-85$). Для численных расчетов магнитных компонент необходимо вычисление профилей показателей преломления нормальных низкочастотных волн в ионосферной плазме. Чтобы продемонстрировать насколько сильно различаются эти профили для разных моделей электронной концентрации, мы привели их на рисунке 7.

Как видно из рисунка 7 наиболее сильно различие в профилях показателя преломления для разных моделей выражено для ночных периодов весной и зимой. Для IRI-2001 модели мы наблюдаем четко выраженную «долину» в профилях показателя преломления, в то время как для Svalbard radar модели «долина» слабо выражена и наблюдаются существенно большие значения показателя преломления на высотах E-слоя. Кроме того, для IRI-2001 модели наиболее сильно различие в показателях преломления в дневное и ночное время суток на высотах максимума F-слоя, в то время как для Svalbard radar модели это различие существенно меньше.

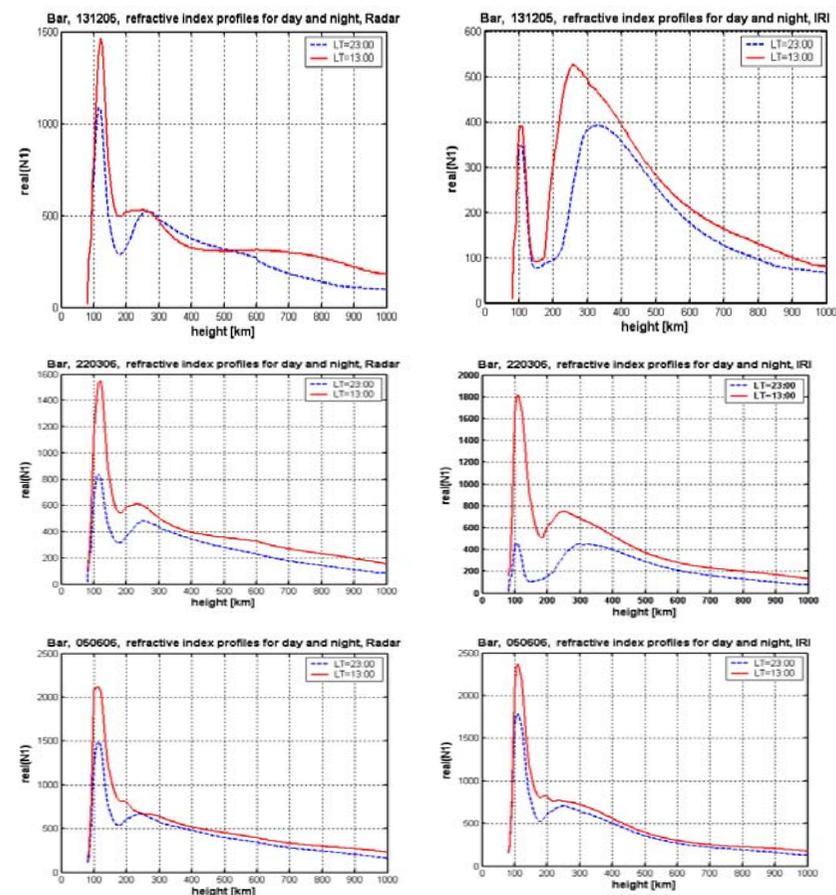


Рис. 7 – Сравнение профилей показателя преломления $real(N)$ в дневное и ночное время суток для разных моделей (Svalbard radar модель 1 – левый столбец).

Рисунок 8 демонстрирует результаты численных расчетов магнитных компонент для Svalbard radar модели.