

Первый опыт оценки ионного состава над ионосферой по данным о частотной структуре излучения ИАР

А.С. Потапов¹, Т.Н. Полюшкина¹, А.В. Ойнац¹,
А.Ю. Пашинин¹, Т. Райта², Б. Цэгмэд³

¹ *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, 664033, Россия*

E-mail: potapov@iszf.irk.ru

² *Геофизическая обсерватория Соданкюля Университета Оулу, Соданкюля, Финляндия*

E-mail: tero.raita@sgo.fi

³ *Институт астрономии и геофизики МАН, Улан-Батор, 13343, Монголия*

E-mail: tseg@iag.ac.mn

В работе на примере анализа спектрограмм эмиссий ионосферного альвеновского резонатора (ИАР), построенных по наблюдениям обсерваторий в средних широтах (Монды, Восточная Сибирь) и в авроральной зоне (Соданкюля, Финляндия), показаны возможности получения информации об ионном составе на высотах от 2000 до 6000 км. Анализ выполнялся на основе сопоставления измеренных на спектрограммах разностей частот соседних гармоник излучения Δf с характеристиками резонатора, вычисленными на основе модели IRI-2012, экстраполированной до высоты 10000 км. Путем подбора коэффициентов в формулах экстраполяции высотных профилей ионов для достижения минимальной невязки между измеренной Δf и ее оценкой, вычисленной на основе модели, находились профили ионного состава в области выше предельной высоты модели IRI-2012, т.е. выше 2000 км. В результате получены графики высотных профилей содержания и абсолютной концентрации трех типов ионов: кислорода, водорода и гелия; прослежены изменения вычисленных профилей при переходе от дневного времени к ночному. Сравнение результатов, полученных для средних и высоких широт, показало их значительное различие. Так, если над обс. Монды относительное содержание ионов кислорода близко к нулю во всем исследуемом диапазоне высот, то на высоких широтах в ранние вечерние часы оно снижается от более 70% на высоте 2000 км до 20% на высоте 4000 км, при этом медленно убывая с приближением к ночи.

Ключевые слова: ионосфера, модель IRI-2012, ионосферный альвеновский резонатор, высотный профиль содержания ионов

Одобрена к печати: 26.02.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-192-202

Введение

Ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) располагается между нижней ионосферой и областью перехода от ионосферы к плазмосфере (в средних широтах) или магнитосфере (в высоких широтах). Стенками его служат резкие градиенты концентрации плазмы ниже слоя F_2 внизу и на высоте 0,5–1,5 земных радиусов вверх. Резонатор удерживает альвеновские волны в диапазоне от долей герца до примерно 10 Гц. Динамический спектр его излучения имеет вид набора наклонных полос, частота которых меняется в соответствии с изменением ионосферных параметров, в первую очередь – концентрации плазмы в слое F_2 ионосферы. Теоретическому и экспериментальному описанию ИАР посвящено много работ (Поляков, Рапопорт, 1981; Беляев и др., 1987; Belyaev et al., 1990; Беляев и др., 1989; Lysak, Yoshikawa, 2006; Demekhov et al., 2000; Yahnin et al., 2003; Hebden et al., 2005).

В последние годы авторами было опубликовано несколько статей по сопоставлению характеристик излучения ИАР с ионосферными параметрами, предсказываемыми моделью IRI-2012 (International Reference Ionosphere – Международная эталонная ионосфера) (Potapov et al., 2014a, 2014b, 2015a, 2015b; Полюшкина и др., 2015). В них показано хорошее соответствие между измеряемой на спектрограмме разностью Δf частот соседних гармоник

ИАР и частотой, равной обратному времени пробега альвеновской волны между стенками резонатора. Последняя частота вычислялась в рамках простейшей модели ИАР с помощью модели IRI-2012, экстраполированной до высоты 10000 км.

В данной работе мы попытаемся использовать полученные ранее результаты для получения новой информации об ионном составе надионосферной области в интервале высот от двух до шести тысяч километров. Эта область наименее исследована, сведения об ее ионном составе чрезвычайно скудны, поскольку возможности наземного зондирования с помощью радаров некогерентного зондирования ограничены высотой не более 2500 км (González et al., 2004), а спутниковые измерения там крайне редки. Мы будем варьировать коэффициенты в формулах экстраполяции высотных ионных профилей, добиваясь наилучшего соответствия между измеренными и вычисленными значениями Δf и пытаюсь таким способом определить оптимальную экстраполяцию высотного профиля каждого сорта ионов.

Использованные данные и метод их обработки

Для анализа были выбраны наиболее отчетливые спектрограммы излучения ИАР с целью сократить до минимума ошибки измерения разности частот между соседними гармониками. Используются данные аналогичных индукционных магнитометров обсерватории Монды ($\varphi = 51,6^\circ$, $\lambda = 100,9^\circ$, $L = 2,1$, $LT = UT+7$) за 11 декабря 2010 г. и обсерватории Соданкюля ($\varphi = 67,4^\circ$, $\lambda = 26,6^\circ$, $L = 5,1$, $LT = UT+2$) за 11 октября 2007 г. Характеристики измерительной аппаратуры описаны в (Полюшкина и др., 2015; Potarov et al., 2015b). Спектрограммы наблюдавшихся эмиссий, полученные с помощью специально разработанной компьютерной программы, показаны на *рис. 1*. Для каждого часа, в течение которого были отчетливо видны полосы эмиссии, визуально измерялись частоты всех наблюдаемых гармоник; на *рис. 1* точки измерений показаны крестиками. Затем для каждого часа на графике откладывались измеренные значения Δf в зависимости от номера гармоники (*рис. 2*). Полученные точки соединялись линией регрессии. Коэффициент наклона линейной регрессии использовался далее в качестве оценки средней разности частот соседних гармоник для данного часа.

Кратко охарактеризуем геофизические условия двух указанных выше интервалов (дней), когда были выполнены измерения. Оба дня попали на период аномального минимума солнечной активности 2007–2010 гг. 11 октября 2007 г. число Вольфа было равным нулю, суммарный суточный Кр-индекс $\Sigma Kp = 10$, причем в период наблюдений (14–20 UT) трехчасовой Кр-индекс не превышал значения $Kp = 0_+$, а в предыдущих пяти 3-часовых интервалах его величина была $Kp = 0_0$. Dst-индекс был положительным, AE-индекс не превышал значения $AE = 32$. День 11 декабря 2010 г. был несколько более активным в геомагнитном отношении, но ненамного. Число Вольфа составляло $W = 16$, индекс Кр в течение суток был не выше $Kp = 0_+$, индекс AE в период наблюдений не превысил значе-

ния $AE = 36$, Dst-индекс колебался в пределах от -1 до $+3$. В целом оба интервала наблюдений были близки к наиболее магнитно-спокойным.

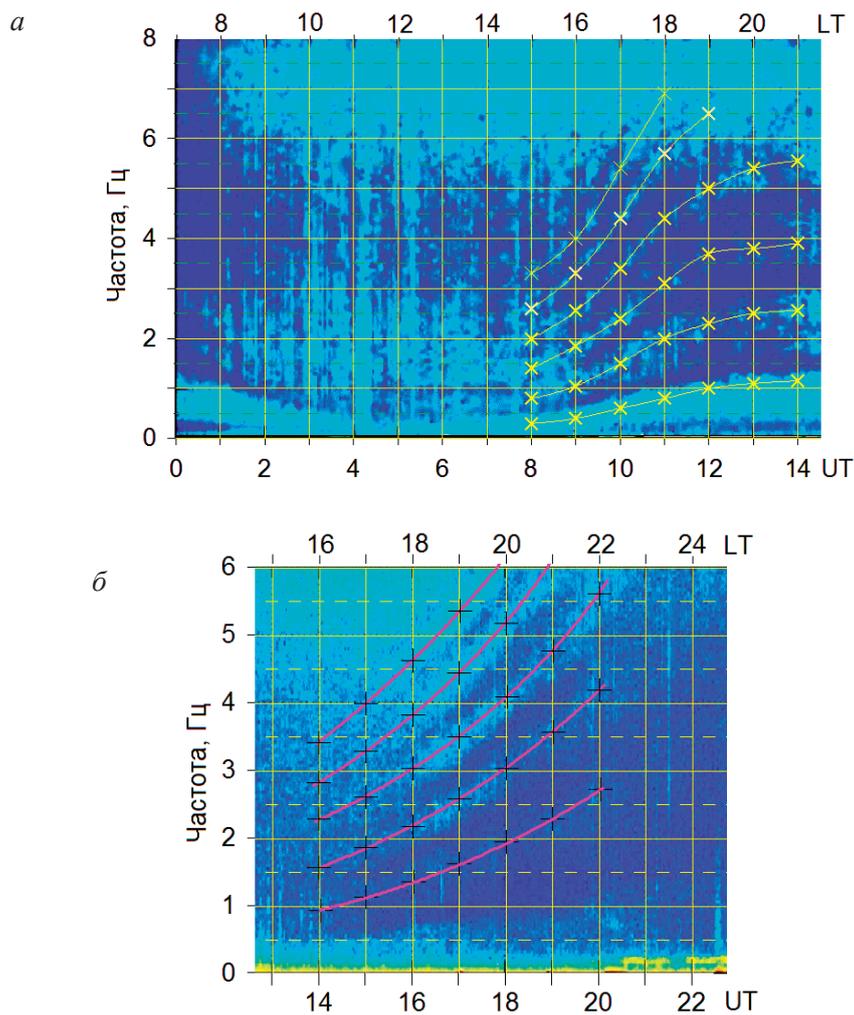


Рис. 1. Динамические спектры излучения ИАР: а – Монды, 11.12.2010 г.; б – Соданкюля, 11.10.2007 г. Точки измерения частот гармоник показаны крестиками и соединены линиями сплайн-аппроксимации

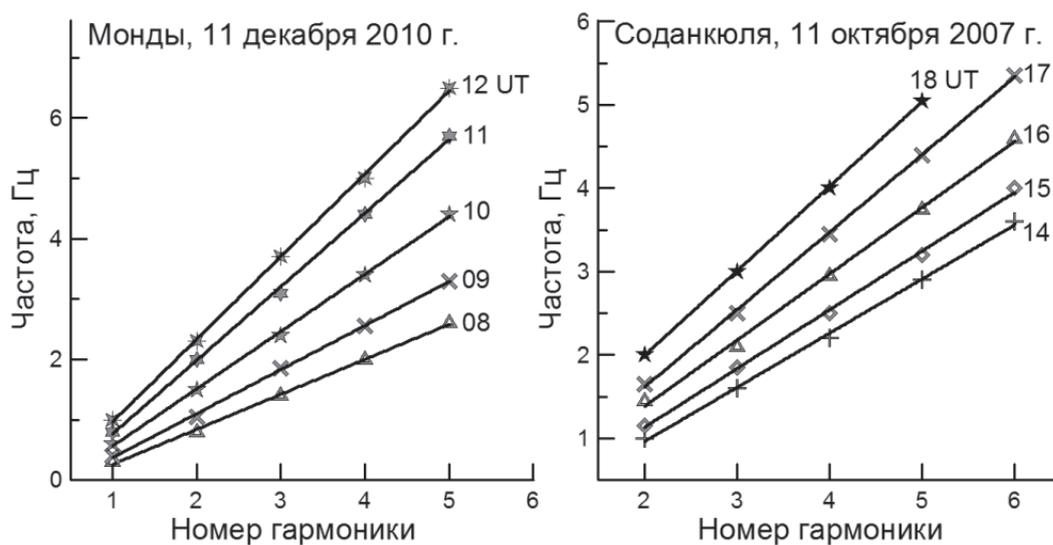


Рис. 2. Графики зависимости частоты излучения от номера гармоники для двух обсерваторий

Анализ

Модель излучения ИАР, используемая нами при анализе наблюдаемых резонансных структур, подробно описана в работе (Полюшкина и др., 2015). Чтобы не учитывать процессы, происходящие при отражении альвеновской волны от стенок резонатора, мы не интересуемся значениями частоты гармоник f_n , а измеряем только разность частот $\Delta f = f_{n+1} - f_n$ (где $n = 1, 2, 3, \dots$) между соседними гармониками. Тогда можно использовать простейшую формулу для времени пробега волны между стенками резонатора:

$$T_0 = \frac{1}{2} \int_{l_{\text{bottom}}}^{l_{\text{top}}} \frac{dl}{A(l)}, \quad (1)$$

обратная величина которого и даст выражение для Δf : $\Delta f = 1/(2T_0)$. В (1) l_{bottom} и l_{top} – положение нижней и верхней стенок резонатора, соответственно; $A(l)$ – альвеновская скорость, которая определяется как:

$$A(l) = \frac{B(l)}{\sqrt{4\pi m_{\text{eff}}(l) N_e(l)}}. \quad (2)$$

Здесь напряженность магнитного поля B , концентрация электронов N_e и эффективная масса ионов m_{eff} меняются вдоль оси резонатора. Эффективная масса ионов определяется суммированием масс ионов с весом, соответствующим относительной концентрации ионов на данной высоте.

Чтобы сравнить теоретически ожидаемую частотную структуру излучения ионосферного альвеновского резонатора с измеряемой в наблюдениях, пользуясь формулами (1) и (2) вычислялись значения времени пробега T_0 для каждого отдельного часа. В качестве нижней границы резонатора l_{bottom} использовалась высота 100 км. В качестве верхней границы резонатора l_{top} бралась высота максимума альвеновской скорости выше слоя F_2 . Высотный профиль магнитного поля $B(l)$ на всем протяжении рассчитывался по модели DGRF/IGRF (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf_vitmo.html). Профиль альвеновской скорости $A(l)$ вычислялся на основе профилей концентрации электронов $N_e(l)$, эффективной массы $m_{\text{eff}}(l)$ и величины магнитного поля $B(l)$, рассчитываемых до высоты $l_* = 2000$ км на основе модели IRI-2012 (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html), а выше 2000 км (и до 10000 км) — на основе интерполяционной формулы, аналогичной использованной в работе (Lysak, 2004):

$$\begin{aligned} N_i(l) &= N_{\text{O}^+} e^{-b_1(l-l_*)} + N_{\text{He}^+} e^{-b_2(l-l_*)} + N_{\text{N}^+} e^{-b_3(l-l_*)} + N_{\text{H}^+} \left(\frac{l_* + R_E}{l + R_E} \right)^p; \\ N_e(l) &= N_i(l); \\ m_{\text{eff}}(l) &= \frac{1}{N_e(l)} \left[16N_{\text{O}^+} e^{-b_1(l-l_*)} + 4N_{\text{He}^+} e^{-b_2(l-l_*)} + 14N_{\text{N}^+} e^{-b_3(l-l_*)} + N_{\text{H}^+} \left(\frac{l_* + R_E}{l + R_E} \right)^p \right]; \\ A(l) &= 21,8B(l) / \sqrt{N_e(l)m_{\text{eff}}(l)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь N_{O^+} , N_{He^+} , N_{N^+} , N_{H^+} – концентрация в см^{-3} ионов кислорода, гелия, азота и водорода на высоте $l_* = 2000$ км (по данным IRI-2012); показатель степени p фиксирован на значении $p = 1$; R_E – радиус Земли (6371 км); m_{eff} измеряется в единицах а.е.м.; $A(l)$ – альвеновская скорость в км/с. При расчете времени пробега T_0 по формуле (1) интеграл вычислялся с шагом $\Delta l = 50$ км.

В работах (Полюшкина и др., 2015; Potarov et al., 2015a,b) значения b_1 , b_2 и b_3 подбирались так, чтобы профиль скорости $A(l)$ ниже l_* “сшивался” без перелома с профилем выше l_* . Это давало довольно высокое соответствие (с коэффициентом корреляции $\sim 0,9$) измеренных Δf_{meas} и вычисленных Δf_{calc} величин. Однако отклонение Δf_{calc} от Δf_{meas} в абсолютном значении в отдельных случаях достигало 0,5 Гц и выше. В данной статье, в отличие от наших предыдущих работ, перед нами стояла цель добиться как можно меньшего отклонения вычисленных значений от измеренных. Поэтому мы отказались от требования гладкости высотного профиля альвеновской скорости и профилей концентрации отдельных ионов (гладкости нет и в профилях, прогнозируемых моделью IRI-2012), а подбирали коэффициенты в формулах экстраполяции (3) так, чтобы минимизировать отклонение Δf_{calc} от измеренного значения Δf_{meas} . Для этого мы численно решали задачу на поиск минимума функции $F(b_1, b_2, b_3) = |\Delta f_{\text{calc}} - \Delta f_{\text{meas}}|$. Идея состоит в том, что оптимизированные таким образом коэффициенты дадут высотные профили ионов, наиболее близкие к реальным. Конечно, такая задача, как всякая обратная проблема, может допускать неоднозначные решения. Поэтому желательно накладывать на отбираемые решения дополнительные условия, ограничения. Например, таким дополнительным требованием может быть условие положительной производной функции, описывающей профиль относительной концентрации протонов на верхней границе рассматриваемой области. В нашем случае – это высота 10000 км. Именно из этих соображений показатель степени p , фигурирующий в члене, описывающем экстраполированный профиль протонов в (3), был зафиксирован равным единице. Практика показала, что если оставить его свободным, и вести поиск минимума функции $F(b_1, b_2, b_3, p)$, то в ряде случаев профили протонов оказываются спадающими, то есть относительная концентрация протонов при $l > 10000$ км стремится к нулю.

На *рис. 3* показаны полученные описанным способом высотные профили трех сортов ионов над obs. Монды (верхние три панели) и obs. Соданкюля (нижние панели) соответственно для семи- и пятичасового интервалов местного времени в период перехода от дня к ночи. Видны существенные различия в поведении относительной концентрации ионов кислорода на средних и высоких широтах: над obs. Монды практически во всем показанном интервале высот (от 2000 до 5500 км) концентрация ионов O^+ возрастает до 20 LT, и лишь к 21 LT она резко падает; в авроральной зоне, наоборот, с 16 до 20 LT она монотонно спадает. Поведение ионов гелия над двумя обсерваториями, напротив, не отличается существенно. Их концентрация возрастает в ранние вечерние часы, а затем падает. Время максимальной концентрации He^+ отличается лишь на час: 17 LT на средней и 18 LT на высокой широте, но при этом относительная концентрация ионов гелия над obs. Монды значительно, на 20–40%, выше, чем над obs. Соданкюля. Не слишком отличается на разных широтах поведение ионов водорода. Их концентрация держится примерно на одном уровне в ранние вечерние часы, но довольно резко возрастает к ночи, достигая почти 100% уже на высоте 4000 км.

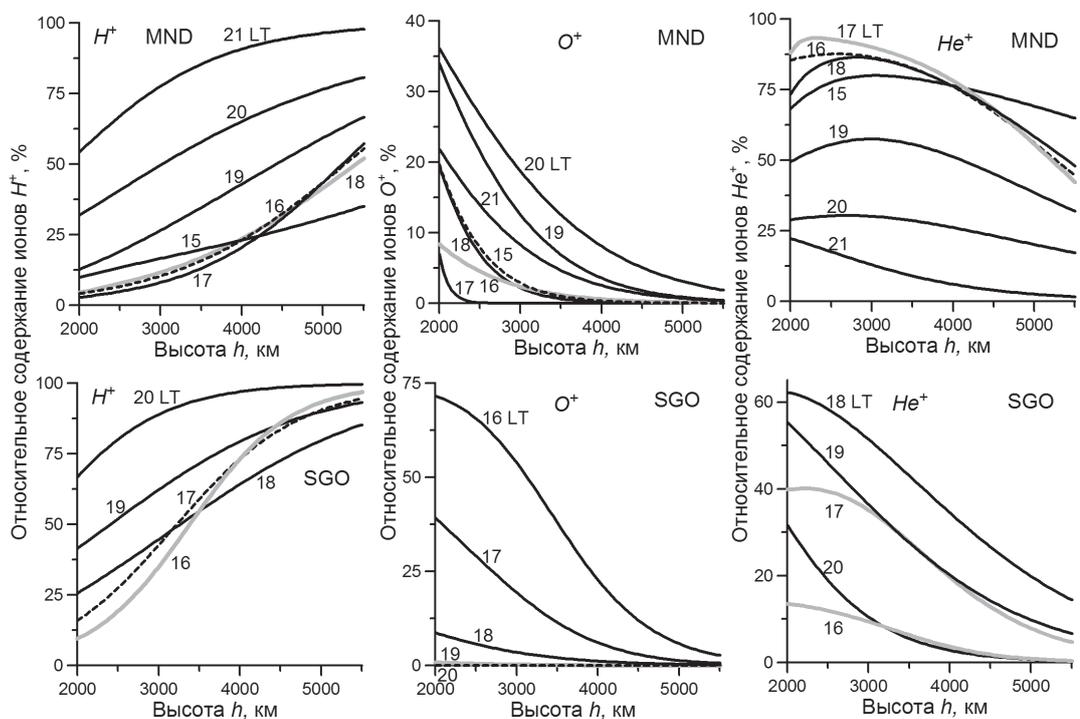


Рис. 3. Высотные профили относительного содержания ионов водорода, кислорода и гелия над обсерваториями Монды (MND) и Соданкюля (SGO), полученные на основе описанной в статье методики

Рис. 4 и 5 иллюстрируют те же тенденции в другом разрезе – показаны графики поведения во времени относительного содержания трех сортов ионов. Здесь проявляются некоторые неочевидные ранее детали. Так, над обс. Монды (рис. 4) концентрация ионов гелия возрастает в ранние вечерние часы не на всех высотах, а только ниже 4000 км.

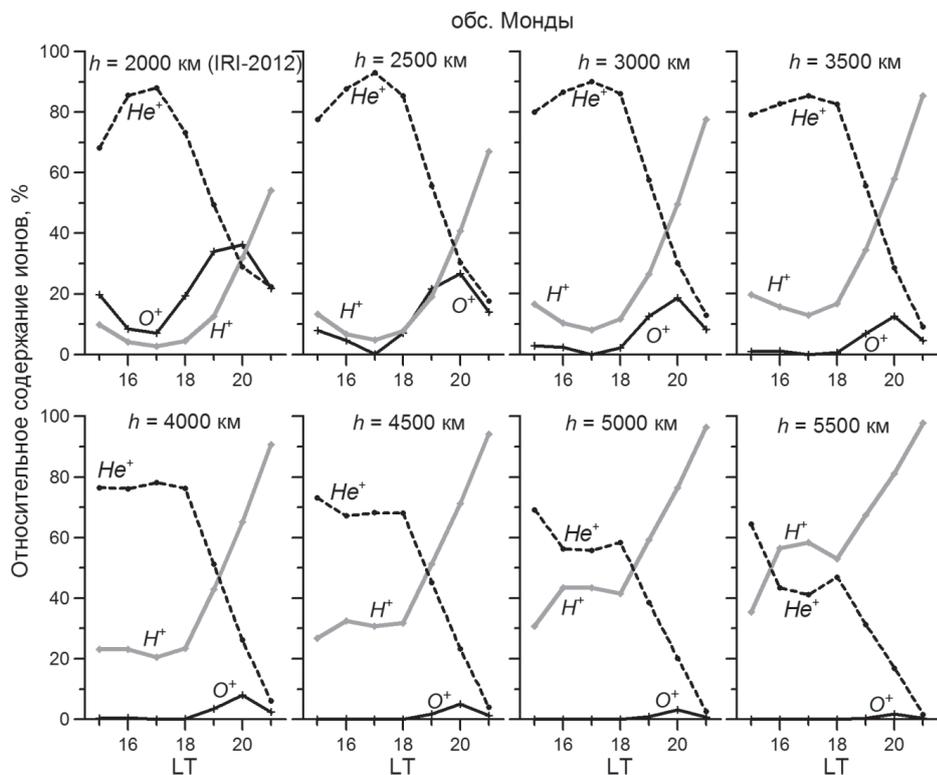


Рис. 4. Изменение в зависимости от местного времени относительной концентрации ионов кислорода, водорода и гелия в диапазоне высот от 2000 до 5500 км над обс. Монды

Концентрация протонов, начиная с высоты 3500 км, над обс. Соданкюля несколько понижается в 18 LT в соответствии с одновременным повышением относительной концентрации ионов гелия. Кроме того, из сравнения *рис. 4* и *5* следует, что максимальное содержание ионов кислорода в течение приведенного на рисунках периода было в два-четыре раза выше в Соданкюля, чем в Мондах. Время достижения этого максимума, как указывалось выше, сдвигается с 16 LT в авральной зоне до 20 LT на среднеширотной обсерватории.

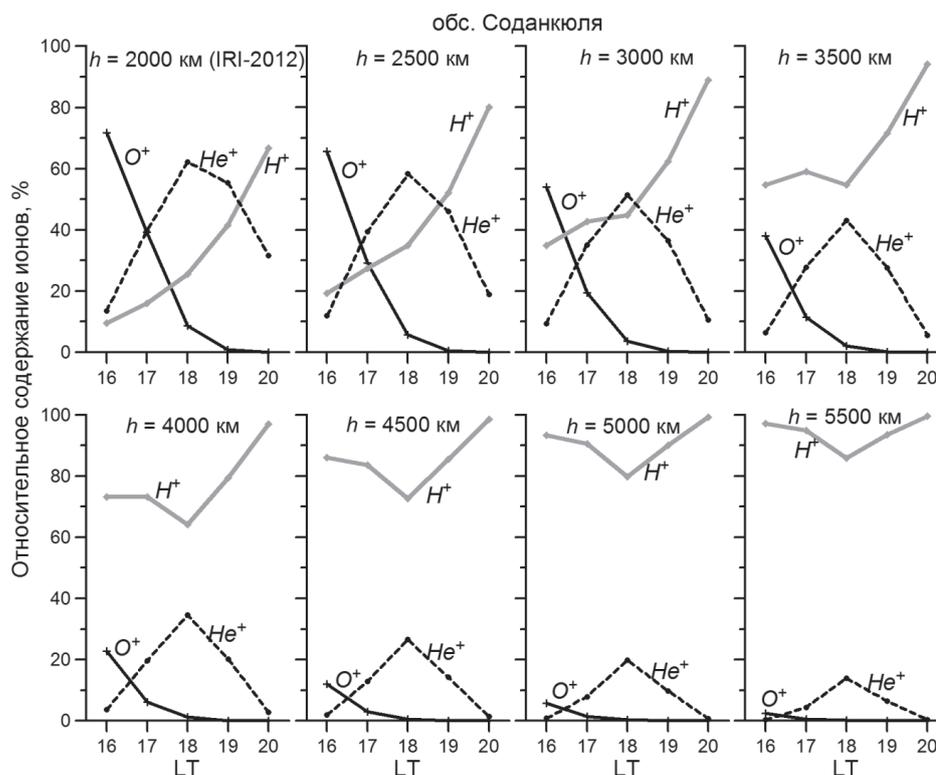


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но над обс. Соданкюля

Обсуждение

Надо, однако, иметь в виду, что все указанные выше закономерности основываются на модели IRI-2012, поскольку экстраполяция надиосферных профилей велась от предсказанных этой моделью значений концентрации ионов на высоте 2000 км. Результаты IRI-2012 на предельных для модели высотах не слишком надежны, особенно в условиях минимума солнечной активности (Heelis et al., 2009), а именно к такому периоду солнечного цикла относятся анализируемые нами события. Можно надеяться, что модель IRI-2012 будет усовершенствована (Truhlik et al., 2015), и тогда оценкам ионного состава надиосферной области, получаемым на основе анализа данных о резонансной структуре ИАР, можно будет доверять больше.

Мы сознаем, что приведенные здесь примеры оценок надиосферного ионного состава с помощью измерения частотной структуры излучения ИАР являются лишь иллюстрацией идеи о возможности таких оценок. Мы ни в коей мере не претендуем на то, чтобы предлагать

эту идею в качестве законченного метода. Для выработки метода необходимо еще проделать большую работу. Во-первых, следует выполнить калибровку алгоритма, используя данные об ионном составе верхней ионосферы, полученные с помощью средств радиозондирования методом некогерентного рассеяния радиоволн или прямых спутниковых измерений. В литературе имеются такие данные для низких и средних широт (Gonzalez et al., 2004; Хабитуев, Шпынев, 2014), но необходимы магнитные и радиоизмерения, выполняемые в одно время и в одном месте. Во-вторых, можно попробовать использовать другие типы модельных профилей. В-третьих, на основе сопоставления с данными прямых спутниковых измерений или результатов радиозондирования можно разработать систему ограничений на предельные значения концентрации ионов в различных геофизических условиях и искать оптимальные профили ионной концентрации уже в пределах этих ограничений. Наконец, как отмечалось выше, большое значение будет иметь уточнение модели IRI для больших высот, близких к предельной высоте модели 2000 км. С другой стороны, возможно использование данных о частотной структуре излучения ИАР для уточнения и расширения высотного диапазона моделей IRI.

Другим путем повышения диагностических возможностей эмиссий ИАР является привлечение информации не только о разности частот соседних гармоник, но и о значениях самих частот. При этом надо будет привлекать более сложную модель ИАР, включающую в себя условия отражения волны на стенках резонатора. Эти условия определяются проводимостью плазмы в области отражения. Попытки сравнения свойств излучения с EISCAT измерениями проводимости плазмы в ионосфере ранее выполнялись (Hebden et al., 2005), однако не дали ожидаемого результата.

Авторы благодарны коллективам обсерватории Соданкюля и Комплексной магнитно-ионосферной обсерватории ИСЗФ СО РАН (Иркутск) за предоставленный материал магнитных наблюдений, а также разработчикам модели IRI-2012 за возможность использовать их модель в он-лайн режиме. Часть работы, выполненная А.С.П., А.В.О. и А.Ю.П. (разработка модели формирования спектра ИАР, анализ ионосферных данных и поиск и выделение сигналов) была поддержана Российским научным фондом (грант 14-37-00027); часть работы, выполненная Т.Н.П. (обработка наблюдений и морфологический анализ), была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 16-05-00631).

Литература

1. *Беляев П.П., Поляков С.В., Рапопорт В.О., Трахтенгерц В.Ю.* Обнаружение резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в 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. 802–810.
3. *Полюшкина Т.Н., Довбня Б.В., Потапов А.С., Цзэмэд Б., Рахматулин Р.А.* Частотная структура спектральных полос ионосферного альвеновского резонатора и параметры ионосферы // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 2. С. 39–57.
4. *Поляков С.В., Рапопорт В.О.* Ионосферный альвеновский резонатор // Геомагнетизм и аэронавигация. 1981. Т. 21. С. 610–614.

5. Хабитыев Д.С., Шпынев Б.Г. Вариации высоты перехода O⁺/H⁺ над восточной Сибирью по данным Иркутского радара HP и ПЭС GPS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 107–117.
6. Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Y. The ionospheric Alfvén resonator // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1990. Vol. 52(9). P. 781–788.
7. Demekhov A.G., Belyaev P.P., Isaev S.V., Manninen J., Turunen T., Kangas J. Modeling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc1 frequency range // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2000. Vol. 62. P. 257–265. Doi: 10.1016/S1364-6826(99)00119-4.
8. González S.A., Sulzer M.P., Nicolls M.J., Kerr R.B. Solar cycle variability of nighttime topside helium ion concentrations over Arecibo // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. A07302. Doi:10.1029/2003JA010100.
9. Hebden S.R., Robinson T.R., Wright D.M., Yeoman T., Raita T., Bösinger T. A quantitative analysis of the diurnal evolution of ionospheric Alfvén resonator magnetic resonance features and calculation of changing IAR parameters // Ann. Geophys. 2005. Vol. 23. P. 1711–1721.
10. Heelis R.A., Coley W.R., Burrell A.G., Hairston M.R., Earle G.D., Perdue M.D., Power R.A., Harmon L.L., Holt B.J., Lippincott C.R. // Geophys. Res. Lett. 2009. Vol. 36. L00C03. Doi:10.1029/2009GL038652.
11. Lysak R.L. Magnetosphere-ionosphere coupling by Alfvén waves at midlatitudes // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. A07201. Doi:10.1029/2004JA010454.
12. Lysak R.L., Yoshikawa A. Resonant cavities and waveguides in the ionosphere and atmosphere, in Magnetospheric ULF Waves // Geophys. Monogr. Ser. Vol. 169 / Ed. K. Takahashi et al. AGU, Washington, D. C., 2006. P.289–306.
13. Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Tsegmed B., Rakhmatulin R.A. Emissions of ionospheric Alfvén resonator and ionospheric conditions // J. Atmosph. Solar Terr. Phys. 2014a. Vol. 119. P. 91–101. Doi: 10.1016/j.jastp.2014.07.001.
14. Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Tsegmed B., Rakhmatulin R.A., Podlesnyi A.V. Frequency structure of IAR spectral bands and parameters of middle and upper ionosphere // Proceedings of General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS). 2014b. XXXIth URSI. P. 1–4. 16–23 Aug. 2014. Doi: 10.1109/URSIGASS.2014.6929785.
15. Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V. Use of the International Reference Ionosphere 2012 model to calculate emission frequency scale of the ionospheric Alfvén resonator // J. Space Weather Space Clim. 2015a. Vol. 5. A14. Doi: 10.1051/swsc/2015018.
16. Potapov A.S., Polyushkina T. N., Oinats A.V., Raita T., Tsegmed B. Adaptation of IRI-2012 model for estimation of IAR harmonic structure // PIERS Proceedings. 2015b. July 6–9, Prague, 2015b. P. 2012–2016.
17. Truhlik V., Bilitza D., Triskova L. Towards better description of solar activity variation in the International Reference Ionosphere topside ion composition model // Adv. Space Res. 2015. Vol. 55. P. 2099–2105. Doi:10.1016/j.asr.2014.07.033.
18. Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., Kangas J., Manninen J., Turunen T. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at L = 5.2 // Ann. Geophys. 2003. Vol. 21. P. 779–786.

First attempt to estimate the ion content over the ionosphere using data from the IAR frequency structure

A.S. Potapov¹, T.N. Polyushkina¹, A.V. Oinats¹, A.Yu. Pashinin¹, T. Raita², B. Tsegmed³

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk 664033, Russia

E-mail: potapov@iszf.irk.ru,

² Sodankylä Geophysical Observatory of Oulu University, Sodankylä, Finland

E-mail: tero.raita@sgo.fi

³ Institute of Astronomy and Geophysics MAS, Ulaanbaatar 13343, Монголия

E-mail: tseg@iag.ac.mn

Ionospheric Alfvén resonator (IAR) is located between the lower ionosphere and the transition area from the ionosphere to the plasmasphere (at middle latitudes), or magnetosphere (at high latitudes). Its walls are sharp gradients in plasma concentration below the F2 layer at the bottom and at the height of 0.5–1.5 Earth radii above. The resonator captures Alfvén waves ranging from a fraction of a hertz to about 10 Hz. The dynamic range of the IAR emission has the form of a set of fan-shaped bands with frequency varying in accordance with the change of ionospheric parameters, primarily the plasma concentration in the F2 layer of the ionosphere. In this paper, using the example of spectrograms calculated from the observations of the IAR emissions in the mid-latitudes (Mondy, Eastern Siberia) and in the auroral zone (Sodankylä, Finland), the possibility of obtaining information on the ion composition at altitudes of 2,000 to 6,000 km is shown. The analysis was carried out by comparing the frequency differences Δf between adjacent harmonics measured from spectrograms with the resonator characteristics calculated on the basis of the IRI-2012 model, extrapolated up to a height of 10,000 km. By selecting coefficients in the extrapolation formulae of ion altitude profiles to achieve a minimum discrepancy between the measured Δf frequency and its estimate calculated on the basis of the model the profiles of ion composition in the region above the IRI-2012 model limit height, i.e., higher than 2,000 km, were obtained. As a result, the graphics of height variations in relative and absolute concentrations of the three types of ions: oxygen, hydrogen and helium were obtained; changes in altitude profiles of these ions during the transition from daytime to night were followed. Comparison of the profiles obtained for the middle and high latitudes showed a significant difference. For example, if over the obs. Mondy relative content of oxygen ions is close to zero in the entire range of heights, then at high latitudes in the early evening hours, it decreases from over 70% at 2000 km to 20% at an altitude of 4000 km and it slowly falls when approaching the night.

Keywords: ionosphere, IRI-2012 model, ionospheric Alfvén resonator, altitude profile of ion content

Accepted: 26.02.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-192-202

References

1. Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Yu., Obnaruzhenie rezonansnoy strukturyi spektra atmosfernogo elektromagnitnogo shumovogo fona v diapazone korotkoperiodnykh geomagnitnykh pulsatsiy (Detection of a resonant electromagnetic structure of the spectrum of atmospheric noise background in the range of short-period geomagnetic pulsations), *Doklady AN SSSR*, 1987, Vol. 297, pp. 840–843.
2. Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengertz V.Yu., Teoriya formirovaniya rezonansnoy strukturyi atmosfernogo elektromagnitnogo shumovogo fona v diapazone korotkoperiodnykh geomagnitnykh pulsatsiy (The theory of the formation of the resonance structure of the atmospheric electromagnetic background noise in the range of short-period geomagnetic pulsations), *Izv. Vuzov. Radiofizika*, 1989, Vol. 32, No. 7, pp. 802–810.
3. Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Potapov A.S., Tsegmed B., Rakhmatulin R.A., Chastotnaya struktura spektralnykh polos ionosfernogo alvenovskogo rezonatora i parametryi ionosferyi (Frequency structure of the spectral bands of the ionospheric Alfvén resonator parameters of the ionosphere), *Geofizicheskiye issledovaniya*, 2015, Vol. 16, No. 2, pp. 39–57.
4. Polyakov S.V., Rapoport V.O., Ionosferyiy alvenovskiy rezonator (Ionospheric Alfvén resonator), *Geomagnetizm i aeronomiya*, 1981, Vol. 21, pp. 610–614.
5. Khabituyev D.C., Shpynev B.G., Variatsii vyisoty perehoda O/H+ nad vostochnoy Sibiryu po dannym Irkutskogo radara NR i PES GPS (Variations of O+/H+ transition height over East Siberia from Irkutsk incoherent scatter data and GPS total electron content), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 1, pp. 107–117.
6. Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Y., The ionospheric Alfvén resonator, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1990, Vol. 52(9), pp. 781–788.
7. Demekhov A.G., Belyaev P.P., Isaev S.V., Manninen J., Turunen T., Kangas J., Modeling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc1 frequency range, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2000, Vol. 62, pp. 257–265, Doi: 10.1016/S1364-6826(99)00119-4.
8. González S.A., Sulzer M.P., Nicolls M.J., Kerr R.B., Solar cycle variability of nighttime topside helium ion concentrations over Arecibo, *J. Geophys. Res.*, 2004, Vol. 109, A07302, Doi:10.1029/2003JA010100.
9. Hebden S.R., Robinson T.R., Wright D.M., Yeoman T., Raita T., Bösinger T., A quantitative analysis of the diurnal evolution of ionospheric Alfvén resonator magnetic resonance features and calculation of changing IAR parameters, *Ann. Geophys.*, 2005, Vol. 23, pp. 1711–1721.

10. Heelis R.A., Coley W.R., Burrell A.G., Hairston M.R., Earle G.D., Perdue M.D., Power R.A., Harmon L.L., Holt B.J., Lippincott C.R., *Geophys. Res. Lett.*, 2009, Vol. 36, L00C03, Doi:10.1029/2009GL038652.
11. Lysak R.L., Magnetosphere-ionosphere coupling by Alfvén waves at midlatitudes, *J. Geophys. Res.*, 2004, Vol. 109, A07201, Doi:10.1029/2004JA010454.
12. Lysak R.L., Yoshikawa A., Resonant cavities and waveguides in the ionosphere and atmosphere, in Magnetospheric ULF Waves, *Geophys. Monogr. Ser.*, Vol. 169, Ed. K. Takahashi et al., AGU, Washington, D.C., 2006, pp. 289–306.
13. Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Tsegmed B., Rakhmatulin R.A. Emissions of ionospheric Alfvén resonator and ionospheric conditions, *J. Atmosph. Solar Terr. Phys.*, 2014a, Vol. 119, pp. 91–101. Doi: 10.1016/j.jastp.2014.07.001.
14. Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Tsegmed B., Rakhmatulin R.A., Podlesnyi A.V., Frequency structure of IAR spectral bands and parameters of middle and upper ionosphere, *Proceedings of General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, 2014b, XXXIth IURSI, pp. 1–4, 16–23 Aug. 2014, Doi: 10.1109/URSIGASS.2014.6929785.
15. Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., Use of the International Reference Ionosphere 2012 model to calculate emission frequency scale of the ionospheric Alfvén resonator, *J. Space Weather Space Clim.*, 2015a, Vol. 5, A14, Doi: 10.1051/swsc/2015018.
16. Potapov A.S., Polyushkina T. N., Oinats A.V., Raita T., Tsegmed B., Adaptation of IRI-2012 model for estimation of IAR harmonic structure, *PIERS Proceedings*, 2015b, July 6–9, Prague, 2015, pp. 2012–2016.
17. Truhlik V., Bilitza D., Triskova L., Towards better description of solar activity variation in the International Reference Ionosphere topside ion composition model, *Adv. Space Res.*, 2015, Vol. 55, pp. 2099–2105, Doi:10.1016/j.asr.2014.07.033.
18. Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., Kangas J., Manninen J., Turunen T., Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0.1–4 Hz at L = 5.2, *Ann. Geophys.*, 2003, Vol. 21, pp. 779–786.