УДК 550.385.37
DOI: 10.12737/szf-73202104

Поступила в редакцию 22.04.2021
Принята к публикации 01.06.2021

# МОРФОЛОГИЯ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ИОНОСФЕРНОГО АЛЬВЕНОВСКОГО РЕЗОНАТОРА

# MORPHOLOGY AND DIAGNOSTIC POTENTIAL OF THE IONOSPHERIC ALFVÉN RESONATOR

**А.С. Потапов**
*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru*

**Т.Н. Полюшкина**
*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, tnp@iszf.irk.ru*

**Б. Цэгмэд**
*Институт астрономии и геофизики МАН, Улан-Батор, Монголия, tseg@iag.ac.mn*

**A.S. Potapov**
*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru*

**T.N. Polyushkina**
*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, tnp@iszf.irk.ru*

**B. Tsegmed**
*Institute of Astronomy and Geophysics MAS, Ulaanbaator, Mongolia, tseg@iag.ac.mn*

**Аннотация.** Слоистость ионосферы приводит к образованию различного рода резонаторов и волноводов. Одним из наиболее известных является ионосферный альвеновский резонатор (ИАР), излучение которого может наблюдаться как на земной поверхности, так и в космосе, в виде веерообразного набора дискретных спектральных полос (ДСП), частота которых плавно меняется в течение суток. Полосы формируются альвеновскими волнами, захваченными между нижней частью ионосферы и перегибом высотного профиля альвеновской скорости в области перехода от ионосферы к магнитосфере. ИАР является одним из важных механизмов ионосферно-магнитосферного взаимодействия. Частота излучения лежит в диапазоне от десятых долей герца до примерно 8 Гц — частоты первой гармоники шумановского резонанса. В обзоре подробно описана морфология явления. Подчеркивается, что излучение ИАР является перманентным явлением, вероятность наблюдения которого в первую очередь определяется чувствительностью аппаратуры и отсутствием помех естественного и искусственного происхождения. Ежедневная длительность наблюдения ДСП зависит от условий освещенности нижней ионосферы: полосы хорошо видны только тогда, когда слой D затенен. Систематизированы многочисленные теоретические модели ИАР. Все они основаны на анализе возбуждения и распространения альвеновских волн в неоднородной ионосферной плазме и различаются в основном источниками генерации колебаний и методами учета различных факторов, таких как взаимодействие волновых мод, дипольная геометрия магнитного поля, частотная дисперсия волн. Предсказываемая всеми моделями резонатора и многократно подтвержденная экспериментально тесная связь изменений частоты ДСП с вариациями критической частоты $f_o$F2 служит основой поиска способов определения в реальном времени электронной концентрации ионосферы по измерениям частоты излучения ИАР. Возможна также оценка профиля ионного состава над ионосферой по данным о частотной структуре излучения ИАР. В обзоре уделяется внимание и другим результатам

**Abstract.** The layering of the ionosphere leads to the formation of resonators and waveguides of various kinds. One of the most well-known is the ionospheric Alfvén resonator (IAR) whose radiation can be observed both on Earth's surface and in space in the form of a fan-shaped set of discrete spectral bands (DSB), the frequency of which changes smoothly during the day. The bands are formed by Alfvén waves trapped between the lower part of the ionosphere and the altitude profile bending of Alfvén velocity in the transition region between the ionosphere and the magnetosphere. Thus, IAR is one of the important mechanisms of the ionosphere-magnetosphere interaction. The emission frequency lies in the range from tenths of hertz to about 8 Hz — the frequency of the first harmonic of the Schumann resonance. The review describes in detail the morphology of the phenomenon. It is emphasized that the IAR emission is a permanent phenomenon; the probability of observing it is primarily determined by the sensitivity of the equipment and the absence of interference of natural and artificial origin. The daily duration of the DSB observation almost completely depends on the illumination conditions of the lower ionosphere: the bands are clearly visible only when the D layer is shaded. Numerous theoretical IAR models have been systematized. All of them are based on the analysis of the excitation and propagation of Alfvén waves in inhomogeneous ionospheric plasma and differ mainly in sources of oscillation generation and methods of accounting for various factors such as interaction of wave modes, dipole geometry of the magnetic field, frequency dispersion of waves. Predicted by all models of the cavity and repeatedly confirmed experimentally, the close relationship between DSB frequency variations and critical frequency $f_o$F2 variations serves as the basis for searching ways of determining in real time the electron density of the ionosphere from IAR emission frequency measurements. It is also possible to estimate the profile of the ion composition over the ionosphere from the data on the IAR emission frequency structure. The review also focuses on other results from a wide range of IAR studies, specifically on the results that revealed the influence of the interplanetary magnetic field orien-

из широкого диапазона исследований ИАР. Упоминаются результаты, выявившие влияние ориентации межпланетного магнитного поля на колебания резонатора, и факты воздействия на ИАР сейсмических возмущений.

**Ключевые слова:** спектральные полосы, ультранизкочастотное излучение, резонатор, стоячие альвеновские волны, гармоническая структура, волновые моды, электронная концентрация, диагностика.

tation on oscillations of the resonator, and on the facts of the influence of seismic disturbances on IAR.

**Keywords:** spectral bands, ultra low frequency emission, resonator, standing Alfvén waves, harmonic structure, wave modes, electron density, diagnostics.

## СОДЕРЖАНИЕ


| | | |
|---|---|---|
| | Введение | 40 |
| 1 | Краткая характеристика теоретических моделей ИАР | 41 |
| 2 | Методы измерения и предварительного анализа | 43 |
| 3 | Морфология излучения ИАР | 43 |
| 3.1 | Характеристики излучения | 43 |
| 3.2 | География ИАР | 44 |
| 3.3 | Зависимость излучения ИАР от цикла солнечной активности, сезона и магнитной возмущенности. Суточный ход вероятности наблюдения ДСП | 45 |
| 3.4 | Особенности спектрограмм излучения ИАР | 47 |
| 4 | Потенциал для диагностики ионосферы | 49 |
| 5 | Влияние внешних факторов | 51 |
| 6 | Обсуждение | 52 |
| | Заключение | 53 |


## ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных особенностей магнитно-плазменной структуры ионосферы является наличие резонансной полости для альвеновских волн между основанием ионосферы и областью перехода к магнитосфере. Вверху резонатор ограничен перегибом профиля альвеновской скорости $c_A = B/\sqrt{4\pi\rho}$ ($B$ — магнитное поле, $\rho$ — плотность плазмы) на высоте примерно от 1000 до 6000 км. Отражение волн там происходит в результате нарушения условий геометрической оптики, поэтому высота верхней границы для каждой частоты слегка разная (конкретное значение высоты зависит от состояния магнитосферно-ионосферной системы). Важное значение имеет ионный состав; это обстоятельство, в принципе, может использоваться для получения сведений о высотных профилях содержания ионов (см. раздел 4).

Нижняя граница полости совпадает с областью E ионосферы на высоте около 100–150 км. Отражение от нее происходит либо за счет высокой поперечной проводимости E-слоя [Lysak, 1991], либо, как и от верхней границы, в результате нарушения условий геометрической оптики [Belyaev, 1989; Belyaev et al., 1990] на резком градиенте альвеновской скорости, возникающем ниже максимума ионизации в слое F2 ионосферы. В реальности, возможно, могут реализовываться оба варианта в зависимости от конкретных условий, однако преимущественным, по-видимому, является первый вариант [Guglielmi et al., 2021]. Существенную роль при этом играет идеальная проводимость земной поверхности. Частота захваченных в полость альвеновских волн лежит в верхней части диапазона ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний — ниже 8–10 Гц.

Первым на возможность существования резонансной полости обратил внимание С.В. Поляков [Поляков, 1976], дав ей название ионосферного альвеновского резонатора (ИАР), ставшее позднее общепринятым. В результате целенаправленных экспериментальных поисков, предпринятых сотрудниками НИРФИ, десятилетием позже П.П. Беляеву [Беляев и др., 1987] удалось обнаружить многополосное УНЧ-излучение, по своим свойствам полностью совпадающее с ожидаемыми свойствами излучения ИАР. На суточной спектрограмме оно имеет характерный вид дискретных спектральных полос (ДСП), частота которых и расстояние между ними (частотный масштаб) возрастают с полудня до полуночи и падают в утренние часы.

Впоследствии ИАР активно изучался совместными усилиями многих как российских, так и зарубежных специалистов. Основной вклад на первом этапе исследований внесли работы [Trakhtengerts, Feldstein, 1991; Lysak, 1991; Беляев и др., 1997]. Вслед за ними в литературе возник целый поток публикаций, в которых предлагались теоретические модели ИАР (см. например, обзор [Lysak, Yoshikawa, 2006] и ссылки в нем) и анализировались результаты наблюдений ДСП в различных регионах [Belyaev et al., 1999; Yahnin et al., 2003; Pokhotelov et al., 2003; Molchanov et al., 2004; Bösinger et al., 2004; Potapov et al., 2014, 2017; Baru et al., 2016].

К настоящему времени стало ясно, что ионосферный альвеновский резонатор является неотъемлемым элементом всей ионосферно-магнитосферной структуры. Он играет существенную роль в энергетическом обмене и взаимодействии между двумя этими областями околоземного пространства. В нашем об-

зоре мы рассмотрим различные аспекты проблемы ИАР, критически описывая ранее полученные результаты и обращая внимание на нерешенные задачи исследований. Мы покажем, что ИАР, как и сама ионосфера, является перманентным объектом, существующим глобально вне зависимости от солнечной и магнитной активности. В то же время характеристики излучения резонатора меняются во времени и пространстве, следуя изменениям состояния ионосферы в данном регионе. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферы, а также ее спорадические возмущения создают эффект модуляции частоты и амплитуды излучения.

Целью данной работы является анализ современного состояния проблемы и обсуждение нерешенных еще вопросов и задач будущих исследований ИАР. В разделе 1 представлен сжатый обзор основных теоретических моделей резонатора и предлагаемых механизмов его возбуждения. В разделе 2 описаны методы наблюдения и предварительного анализа излучения ИАР, а далее — его морфологические характеристики. В разделе 4 обсуждаются возможности и трудности использования измерений излучения резонатора для диагностики состояния ионосферы и вариаций ее параметров. Далее рассматривается влияние внешних воздействий на амплитудный и частотный режим резонатора (раздел 5). В заключительных двух разделах обсуждаются общие аспекты проблемы и формулируются выводы.

## 1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИАР

В литературе были предложены различные варианты модели генерации излучения ИАР [Trakhtengertz, Feldstein, 1987; Lysak, 1991; Belyaev et al., 1989, Поляков, Рапопорт, 1981; Demekhov et al., 2000; Pokhotelov et al., 2000; Lysak, Yoshikawa, 2006; Fedorov et al., 2016a, c]. Все они основаны на представлении о захвате альвеновских волн в ионосфере между ее нижней частью и областью перехода от ионосферы к магнитосфере, где имеется нарушение условий геометрической оптики. Несколько в стороне от общего направления находится группа работ (см. например, [Schekotov et al., 2011]), в которых причиной появления большей части событий ДСП называется не излучение резонатора, а спектральное представление так называемых парных импульсов, первый из которых соответствует молниевому разряду, а второй является следствием отражения первого от верхней границы ионосферы. В любом случае общим методом анализа является решение дисперсионного уравнения для электромагнитных волн в ионосферной плазме с учетом граничных условий. Мы не будем приводить здесь детали вычислений, которые можно найти в перечисленных выше работах, а представим основные выводы, следующие из аналитических и численных расчетов.

В наиболее простой модели, предложенной в работе [Поляков, Рапопорт, 1981], частота $n$-ой гармоники резонатора равна

$$f_n = \frac{c_A}{2L}(n + \Phi), \qquad (1)$$

где $L$ — длина резонансной полости вдоль силовой линии; $c_A$ — альвеновская скорость в предположении однородной полости; Ф — фазовый фактор, зависящий от условий отражения волны от нижней границы резонатора. Более детальные соотношения между частотами ИАР и критической частотой F2-области ионосферы, а также величиной полного электронного содержания даны в работе [Fedorov et al., 2016c]. Коэффициент отражения волны зависит от интегральной педерсеновской проводимости плазмы $\Sigma_p$ нижней ионосферы на высоте около 100 км (см. например, [Belyaev et al., 1990]):

$$R_l = \frac{1 - 4\pi\, \Sigma_p c_A / c^2}{1 + 4\pi\, \Sigma_p c_A / c^2}, \qquad (2)$$

а фазовый фактор показывает, насколько меняется фаза волны при отражении. Его величина равна доле четверти волны, которая добавляется к целому числу полуволн при установлении режима стоячих альвеновских волн, необходимого для резонанса. Это означает, что в зависимости от величины Ф на нижней границе формируется узел или пучность электрического поля волны, захваченной в резонаторе [Lysak, 1991; Hebden et al., 2005]. Считается, что днем в условиях освещенности нижней ионосферы ультрафиолетовое излучение Солнца обеспечивает высокую интенсивность ионообразования и соответственно рост проводимости. В этих условиях на нижней границе резонатора образуется узел волнового поля для всех гармоник. И, наоборот, в ночное время при минимальной проводимости ионосферы сдвиг фазы на нижней границе приводит к формированию там пучности волнового поля (рис. 1). Кроме того, меняющаяся под действием изменений освещенности проводимость плазмы нижней ионосферы формирует суточную зависимость добротности резонатора [Поляков, Рапопорт, 1981; Nosé et al., 2017].

В свою очередь, глубина и форма такой модуляции оказываются зависящими от сезона и широты места наблюдения. В низких широтах добротность очень резко меняется при прохождении терминатора, но слабо зависит от сезона [Nosé et al., 2017]. В средних и особенно высоких широтах сезонная зависимость велика и проявляется в том, что зимой добротность слабее зависит от местного времени, чем летом [Yahnin et al., 2003].

Верхнюю границу резонатора по разным источникам образует максимум альвеновской скорости на высоте от одной до нескольких тысяч километров [Lysak, 1991], где расположена область перехода от ионосферы к магнитосфере, либо просто перегиб профиля скорости там же, приводящий к нарушению условий геометрической оптики в этой области и частичному отражению энергии волн [Поляков, Рапопорт, 1981]. На условия отражения от верхней границы вряд ли может оказывать влияние суточный и сезонный ход, но считается, что коэффициент отражения там может зависеть от магнитной и солнечной возмущенности магнитосферы [Беляев и др., 1997].

Несмотря на простоту модели, приводящей к формуле (1), соотношение между резонансными частотами ИАР и параметрами ионосферы вполне убеди-

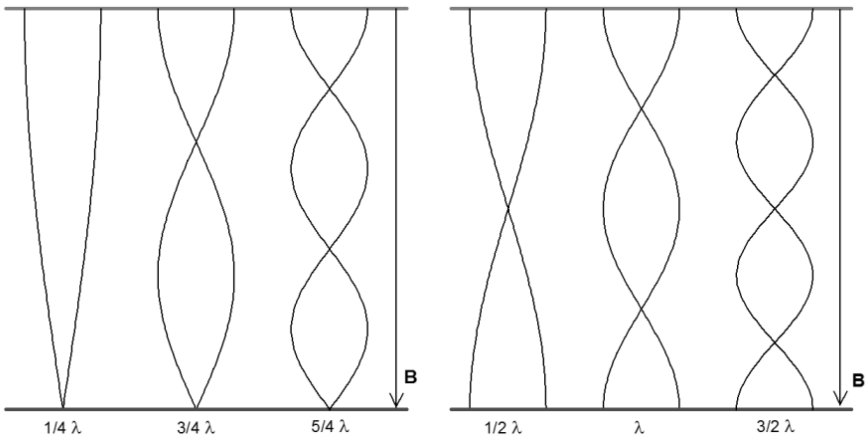


*Рис. 1.* Схема, иллюстрирующая конфигурацию перпендикулярного электрического поля в стоячей альвеновской волне для первых трех собственных мод, захваченных в ИАР в случае высокой (слева) и низкой (справа) проводимости ионосферы. Нижние горизонтальные линии обозначают нижнюю ионосферу, а верхние — верхнюю границу ИАР в области перехода к магнитосфере [Hebden et al., 2005]

тельно подтверждается измерениями. Наиболее тесная связь наблюдается между вариациями частотного масштаба ДСП и изменениями электронной концентрации в максимуме слоя F2 ионосферы, жестко определяющей критическую частоту $f_o$F2 зондирования ионосферы. Ниже мы вернемся к этому вопросу.

Простейшая модель однородной резонансной полости в дальнейшем развивалась с применением как аналитических, так и численных методов. Так, Lysak [2004] представил численную модель в виде радиально стратифицированной ионосферы, учитывающую, кроме слоистости, наклон силовых линий дипольного геомагнитного поля. В работах [Lysak, Yoshikawa, 2006; Lysak et al., 2013] эта модель была дополнена учетом реалистичного высотного профиля проводимости ионосферы. Во всех вариантах расчетов принималось во внимание взаимодействие захваченных в резонаторе альвеновских волн с магнитозвуковыми волнами, распространяющимися вдоль Земли в ионосферном волноводе на уровне слоя F2, а также с волнами, возбуждаемыми в альвеновском магнитосферном резонаторе (field-line resonator). Учитывалось также влияние продольных токов в области высоких широт.

В работах [Sciffer, Waters, 2002; Sciffer et al., 2005] обсуждалась роль проводимости Холла в слое E ионосферы для возможности наземного наблюдения излучения ИАР. Было показано, что в отличие от более ранних результатов при наклонных силовых линиях внешнего магнитного поля волна может проникать к Земле сквозь ионосферу даже при нулевой холловской проводимости.

В работе [Lysak et al., 2013] приведен пример численного расчета, иллюстрирующий влияние ИАР на режим геомагнитных пульсаций Pc1 с частотой 1–2 Гц. Серии Pc1 длятся дольше, когда их частота совпадает с частотой одной из гармоник ИАР; при этом несущая частота Pc1 следит за изменениями частоты излучения резонатора. Авторы объясняют эффект тем, что волны Pc1 захватываются резонатором и заимствуют у него энергию. Но такое объяснение не единственное. Дело в том, что на гармониках ИАР образуются так называемые окна прозрачности для падающих из магнитосферы излучений. Поэтому на Земле наблюдаются преимущественно те серии Pc1, частота которых совпадает с одной из резонансных частот ИАР. Это уверенно подтверждается экспериментальными фактами, свидетельствующими о появлении пакетов Pc1 преимущественно вблизи гармоник излучения ИАР и согласованных с ними по частоте [Prikner et al., 2004; Довбня и др., 2019a].

Много внимания в литературе уделялось поиску возможных источников — драйверов, возбуждающих колебания ИАР. В работах [Trakhtengertz, Feldstein, 1987; Lysak, 1991; Pokhotelov et al., 2001] предлагалась гипотеза о так называемой неустойчивости обратной связи как источнике энергии волн в полости ИАР. Дело в том, что связанный с захваченными в резонатор альвеновскими волнами продольный ток может вызывать высыпание энергичных электронов, стимулируя дополнительную ионизацию в ионосфере и модулируя ионосферную проводимость. Такая обратная связь при определенных соотношениях между характеристиками волн и отражающими способностями ионосферы может приводить к неустойчивости, подпитывающей захваченные в резонатор волны. В работе [Trakhtengertz, Feldstein, 1987] в цепочку обратной связи включались также мелкомасштабные неоднородности магнитосферной конвекции и турбулентный нагрев ионосферной плазмы. Однако этот механизм может работать на высоких широтах, но маловероятен на средних и низких, где излучение ИАР наблюдается не реже, чем в авроральной или субавроральной зонах. К тому же неустойчивость обратной связи приводит к возбуждению волн с большими волновыми числами. Такие волны не проникают к земной поверхности. Поэтому уже в первых работах по изучению ИАР был предложен другой механизм — возбуждение резонатора за счет грозовой активности [Belyaev et al., 1989] — как глобальной, так и местной. Подробнее этот механизм рассмотрен в работах

[Surkov et al., 2004, 2006; Fedorov et al., 2016b]. Молниевый разряд моделировался как излучение электрического диполя. Хотя нарастание тока разряда длится микросекунды, его затухание происходит экспоненциально с временным масштабом десятой доли секунды. Такой быстро нарастающий и медленно замирающий процесс имеет почти плоский спектр на частотах ниже обратного времени затухания, т. е. порядка 10 Гц в данном случае, что укладывается в диапазон частот ИАР. Еще одним возможным источником энергии для возбуждения колебаний ИАР могут быть флуктуации нейтрального ветра, вызывающие переменные ионосферные токи в E-слое [Molchanov et al., 2004; Surkov et al., 2004]. Эти токи могут излучать альвеновские и быстрые магнитозвуковые волны. Первые проникают в верхнюю ионосферу и магнитосферу и могут захватываться в ИАР. Вторые распространяются вдоль ионосферного волновода и переносят таким способом энергию далеко от места генерации, где могут трансформироваться в альвеновские волны и подпитывать там резонатор.

## 2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Рисунок 2 показывает типичный пример суточной спектрограммы излучения резонатора. Дискретные спектральные полосы отражают гармоническую структуру излучения. Весь диапазон излучения занимает интервал от десятых долей герца до ~8 Гц — частоты первой гармоники шумановского резонанса. Амплитуда излучения мала, она не превышает единиц пикотесла. Фактически мы видим шум, интенсивность которого модулирована резонатором. Из непрерывного спектра шумового фона выделяются частоты, близкие к резонансным частотам ИАР. В отличие от резонансов Шумана, первая гармоника которых видна как горизонтальная полоса на верхнем краю спектрограммы (рис. 2), частота каждой из гармоник ИАР непрерывно меняется в течение суток, проходя две-три октавы. Дело в том, что шумановские резонансы возникают в глобальном сферическом резонаторе Земля—ионосфера, параметры которого почти не меняются во времени (изменения собственной частоты не превышают обычно 10 %). В противоположность этому резонансные частоты ИАР определяются главным образом электронной концентрацией в ионосфере, сильно меняющейся в течение суток в соответствии с изменениями потока ультрафиолетового излучения Солнца.

Малая амплитуда излучения ИАР требует использования для его измерения высокочувствительной аппаратуры и отсутствия внешних помех искусственного или естественного происхождения. Наиболее часто применяемым устройством для регистрации УНЧ-излучений такого рода является индукционный магнитометр. Он состоит из многовитковой катушки с сердечником из сплава, обладающего высокой магнитной проницаемостью, предварительного усилителя, набора фильтров, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и цифрового накопителя. Для привязки к точному времени прибор должен быть оборудован приемником сигнала от глобальной навигационной спутниковой системы (GPS и/или ГЛОНАСС). Спектрограмма, показанная на рис. 2, получена путем обработки записей индукционного магнитометра LEMI-30. Регистрируют обычно две горизонтальные или все три ортогональные компоненты УНЧ-колебаний магнитного поля. Магнитометр должен быть расположен вдали от источников промышленных помех и иметь в своем составе полосно-заграждающий фильтр на 50 Гц.

Визуализация излучения ИАР выполняется путем построения спектра данных с выхода магнитометра. Наиболее иллюстративен динамический спектр, но для отслеживания вариаций амплитуды более удобна временная последовательность обычных спектров мощности излучения. При построении динамического спектра подбираются наиболее подходящие значения спектрального окна, перекрытия и других параметров в зависимости от частоты опроса АЦП, которая для успешного отображения всех деталей ДСП должна быть не менее 32 Гц, а разрядность АЦП — не менее 24. Чаще всего строятся суточные спектрограммы излучения.

Дальнейший анализ проводится обычно визуальными методами: на спектрограмме с помощью курсора измеряются значения частоты каждой из ДСП через определенные интервалы времени, строятся таблицы, которые сопоставляются с аналогичными таблицами других геофизических параметров и проводятся статистический и другие виды анализа в зависимости от целей исследования.

## 3. МОРФОЛОГИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ИАР

### 3.1. Характеристики излучения

Как уже отмечалось выше, на суточной спектрограмме излучение имеет вид набора веерообразных ДСП. В разных условиях бывает видно от двух-трех до десяти полос. Наиболее отчетливыми бывают обычно вторая и третья гармоники сигнала, т. е. вторая и третья полосы снизу; первая гармоника часто маскируется шумом других низкочастотных колебаний, а верхние полосы постепенно сливаются с фоном из-за естественного затухания амплитуды сигнала с ростом номера гармоники.

Наиболее яркой особенностью поведения ДСП является их суточный ход. Ниже всего полосы опускаются вблизи местного полудня, в это же время минимален зазор между полосами и их толщина. Максимум частоты ДСП всегда падает на ночное время, но этот максимум размыт и может сдвигаться по времени на два-три часа. Толщина полос и расстояние между ними (так называемый частотный масштаб) в это время максимальны, полосы иногда идут почти параллельно оси времени, но часто имеют волнообразный вид. Частотный масштаб и частота каждой из гармоник может меняться в течение суток в 2–3 раза. Так, в среднеширотной обсерватории Монды (координаты см. в таблице) на фазе максимума солнечной активности частотный масштаб ото дня к ночи возрастает в среднем от 0.25–0.35 до 0.72–0.9 Гц, а в минимуме солнечного цикла —

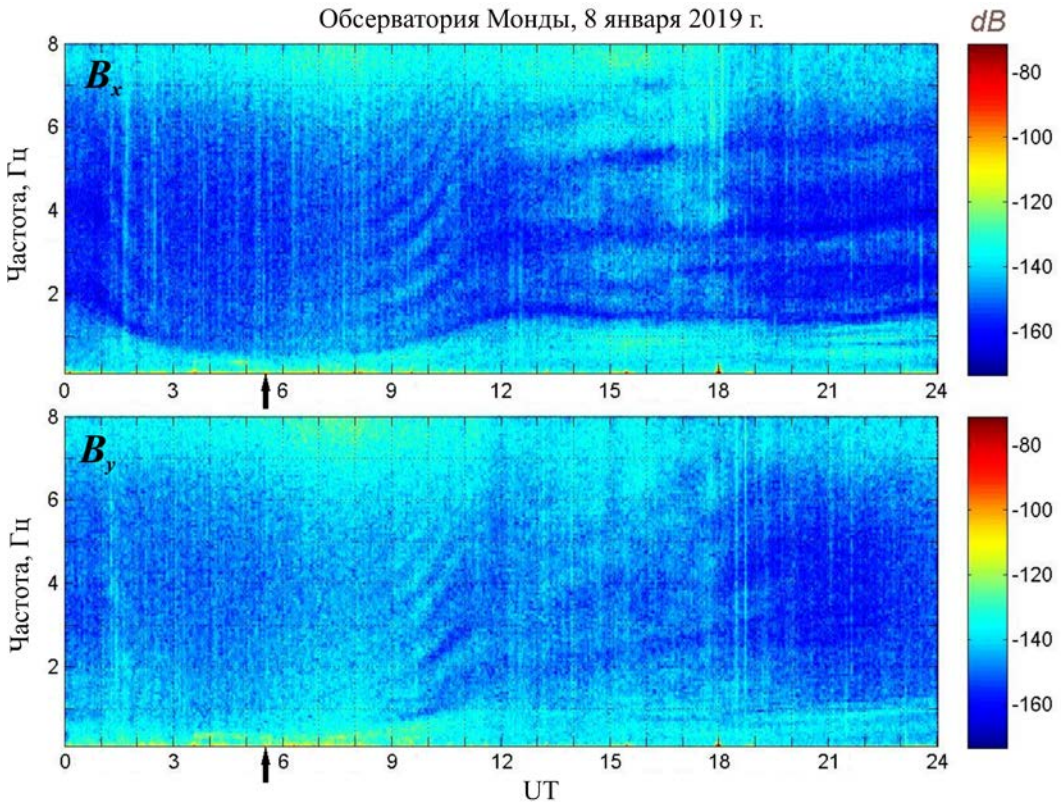


*Рис. 2.* Пример суточной спектрограммы излучения резонатора. Показаны две составляющие магнитного поля: меридиональная $B_x$ и азимутальная $B_y$. Цветные полосы справа позволяют соотнести цвета на динамическом спектре с интенсивностью излучения в децибелах. Стрелки под осями времени показывают местный полдень

от 0.45–0.65 до 1.0–1.5 Гц. На рис. 3 показаны типичные спектрограммы излучения для зимних месяцев солнечного минимума и максимума.

Амплитуда ДСП тоже меняется в течение суток, хотя ее изменения в отличие от суточного хода частоты нерегулярны. Когда полосы становятся едва различимыми или совсем исчезают, трудно бывает понять, связано ли это с уменьшением интенсивности излучения или с усилением нерегулярного фона, экранирующего излучение ИАР. Иногда появляется какой-то посторонний яркий сигнал, который из-за ограниченности динамического диапазона всей системы отображения затмевает хорошо видимые до этого и полностью исчезающие на спектрограмме ДСП. Но в целом ДСП лучше всего видны ночью. В зимнее время они могут наблюдаться круглые сутки, а в летнее появляться лишь на два-три часа в ночное время.

Перечисленные особенности ДСП вполне объяснимы с точки зрения имеющихся представлений о природе ИАР и его излучения. Есть, однако, некоторые детали, не укладывающиеся в стандартную модель резонатора. Позднее мы обсудим их, а здесь просто упомянем о таких частных аномалиях в облике ДСП, как расщепление полос на более мелкие, их раздвоение, слияние, а также различия в поведении полос в разных компонентах излучения.

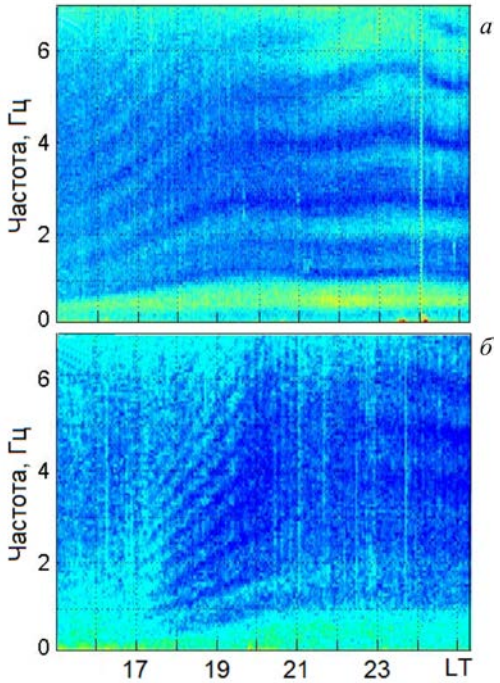


*Рис. 3.* Типичные спектрограммы излучения ИАР, наблюдавшегося в обсерватории Монды зимой во время минимума солнечного цикла 26.12.2009 (*а*) и на фазе максимума цикла 11.02.2012 (*б*)

### 3.2. География ИАР

Географическое распределение наблюдавшихся ДСП достаточно широко. В таблице приведены сведения о расположении обсерваторий и станций, упоминающихся в данном обзоре. Указаны географические и исправленные геомагнитные координаты. Последние рассчитаны для точки на высоте 100 км

Координаты обсерваторий и станций, результаты наблюдений на которых упомянуты в обзоре

| Обсерватория (станция) | Географические координаты | | Исправленные геомагнитные координаты | | *L*-параметр магнитной оболочки | Эпоха |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | φ | λ | Φ | Λ | | |
| Исток | 70.0 | 88.0 | 66 | 163 | 6.09 | 2015 |
| Килписъярви | 69.0 | 20.9 | 66 | 105 | 6.01 | 1993 |
| Соданкюля | 67.2 | 26.4 | 64 | 107 | 5.25 | 1997 |
| Лехта | 64.7 | 33.9 | 61 | 112 | 4.25 | 2012 |
| Гакона | 62.4 | 214.8 | 64 | 269 | 4.96 | 2006 |
| Борок | 58.1 | 38.2 | 54 | 113 | 2.95 | 2000 |
| Новая Жизнь | 56.0 | 45.7 | 52 | 120 | 2.62 | 1985 |
| Карымшина | 52.9 | 158.2 | 46 | 227 | 2.14 | 2001 |
| Монды | 51.6 | 100.9 | 47 | 175 | 2.21 | 2013 |
| Улан-Батор | 47.9 | 106.8 | 43 | 181 | 1.93 | 2015 |
| Крит | 35.2 | 25.2 | 28 | 97 | 1.31 | 1999 |
| Мурото | 33.3 | 134.2 | 27 | 207 | 1.28 | 2015 |
| Акад. Вернадский | –65.7 | 295.7 | –51 | 9 | 2.57 | 2008 |

над станцией наблюдения на эпоху, приведенную в последнем столбце. Она соответствует середине периода наблюдений на данной станции. Указан также *L*-параметр сопряженной со станцией магнитной оболочки. Использовался алгоритм [https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html].

Впервые излучение ИАР было обнаружено на средних широтах [Беляев и др., 1987] на ст. Новая Жизнь, а позже и на многих других среднеширотных станциях — в России от обсерватории Борок [Довбня и др., 2019a] до ст. Карымшина близ Петропавловска-Камчатского [Molchanov et al., 2004]. В высоких широтах ДСП ИАР наблюдались как в Арктике на ст. Килписъярви [Belyaev et al., 1999], в обсерватории Соданкюля [Yahnin et al., 2003], на ст. Гакона [Parent et al., 2010] и Исток недалеко от Норильска [Potapov et al., 2017], так и в Антарктике на ст. Академик Вернадский [Колосков, Бару, 2012]. Регистрировались ДСП и на низкоширотных станциях на о-ве Крит [Bösinger et al., 2002] и на ст. Мурото [Nosé et al., 2017]. В ряде работ сопоставлялись наблюдения ДСП на двух и более станциях [Demekhov et al., 2000; Pokhotelov, 2003; Колосков, Бару, 2012; Potapov et al., 2017]. Наиболее ценные результаты были получены путем синхронных измерений с помощью цепочек магнитометров. В работе [Potapov et al., 2017] сопоставлялись одновременные наблюдения излучения ИАР на меридиональной цепочке из трех станций в диапазоне геомагнитных широт от 43° (обсерватория Улан-Батор) до 66° (ст. Исток). В работе [Nosé et al., 2017] магнитометры располагались на низких широтах вдоль меридиональной цепочки длиной 5.8°. Важные для изучения структуры ИАР результаты были получены в работе [Ivanov et al., 2017], где анализируются одновременные наблюдения электрических составляющих излучения на пяти станциях. Цепочка станций с шагом ~50 км была вытянута вдоль меридиана в районе ионосферного провала.

На средних и высоких широтах морфологические свойства излучения ИАР практически не отличаются. В то же время, как свидетельствуют одновременные наблюдения на двух среднеширотных и одной высокоширотной станциях [Potapov et al., 2017], частотный режим на каждой из станций отражает состояние ионосферы над ней. При этом даже на удаленных станциях значения частот могут быть в разные дни как близкими, так и сильно отличающимися. На низких широтах свойства излучения ИАР изучали две группы авторов [Bösinger et al., 2002, 2004; Nosé et al., 2017]. Они обнаружили ряд свойств, отличающих низкоширотные ДСП от средне- и высокоширотных. В основном это касается частотного масштаба $\Delta f$ излучения. На низких широтах он может меняться от характерного для средних широт до гораздо меньших значений. Подробнее мы обсудим эти особенности в следующих подразделах.

В целом результаты исследований пространственного распределения излучения ИАР показывают, что ионосферный альвеновский резонатор является глобальным перманентным явлением, однако свойства его излучения имеют региональный характер, зависящий от ионосферных условий в конкретном регионе. Специальные наблюдения с целью измерения радиуса корреляции характеристик и временных вариаций ДСП пока не проводились. Однако имеющиеся данные, основанные на выводах работ [Potapov et al., 2017; Nosé et al., 2017], позволяют оценить его как лежащий в диапазоне 500–1000 км, что сопоставимо с радиусом корреляции (~1000 км), обеспечивающим коэффициент корреляции не менее 0.7 между вариациями $f_o$F2 [Stanislawska et al., 1997].

### 3.3. Зависимость излучения ИАР от цикла солнечной активности, сезона и магнитной возмущенности. Суточный ход вероятности наблюдения ДСП

На рис. 4 показаны гистограммы частоты появления ДСП в 2010–2019 гг. (за исключением 2015 г., когда наблюдения не выполнялись). Магнитные измерения в УНЧ-диапазоне проводились на среднеширотной обсерватории Монды (координаты см. в табл. 1), расположенной в Восточных Саянах у границы с Монголией. Период наблюдений практически совпадает с 24-м солнечным циклом и включает в себя 2467 дней. Из них в течение 2402 дней

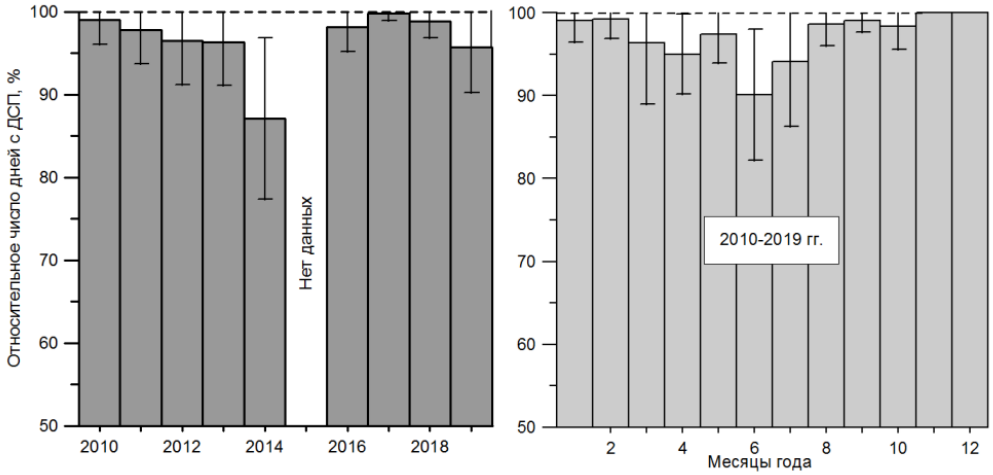


*Рис. 4.* Гистограммы относительного числа дней, во время которых в обсерватории Монды с 2010 по 2019 гг. наблюдались ДСП ИАР: в зависимости от года наблюдений (слева); в зависимости от месяца года (справа). Вертикальные линии показывают среднеквадратические отклонения

(более 97 % от общего числа) наблюдались хотя бы краткие интервалы ДСП. Первая гистограмма (рис. 4, слева) показывает циклическую вариацию вероятности наблюдения излучения ИАР в ходе цикла солнечной активности. Высота столбцов пропорциональна отношению числа дней, суточные спектрограммы которых содержат как минимум двухчасовые интервалы ДСП, к общему числу дней, для которых в течение данного года имелись результаты наблюдений. В целом видно, что отсутствие излучения ИАР является, скорее всего, исключением из правил. Тем не менее, определенный циклический ход прослеживается. Максимум числа дней без ДСП падает на 2014 г. — пик солнечной активности в 24-м цикле.

Вторая гистограмма (рис. 4, справа) построена для иллюстрации сезонного хода частоты появления ДСП. На ней, так же как на первой, высота столбцов показывает относительное число дней, содержащих как минимум двухчасовые интервалы ДСП, но не по годам, а по месяцам за весь период наблюдений. Подобно циклической вариации, частота появления ДСП слабо зависит и от сезона. Но все же в летние месяцы дней без следов ДСП заметно больше, особенно в июне. Это связано с тем, что в некоторые летние дни значительно возрастает уровень однородного дневного шумового фона [Довбня, др., 2019б]. Источник его малоизучен, можно отметить только одну работу, посвященную природе этого явления [Гохберг, 1998].

Еще одним фактором, влияющим на вероятность наблюдения излучения ИАР, считается магнитная активность [Yahnin et al., 2003; Molchanov et al., 2004]. Однако при условии использования для наблюдений высокочувствительной аппаратуры [Potapov et al., 2014; Полюшкина и др., 2015] зависимость от магнитной активности частоты появления ДСП на суточных спектрограммах оказывается очень слабой. Скорее всего, мощные геомагнитные возмущения просто маскируют ДСП, как отмечено в [Molchanov et al., 2004]. С другой стороны, такие возмущения, модифицируя параметры ионосферы, могут влиять на частотный режим резонатора, как это показано в работах [Parent et al., 2010; Semenova, Yahnin, 2014] и как обсуждается ниже.

Следует заметить, что приведенные выше результаты, так же как описанные в работах [Potapov et al., 2014; Полюшкина и др., 2015], сильно расходятся с выводами ранее опубликованных работ [Беляев и др., 1997; Yahnin et al., 2003; Molchanov et al., 2004]. В них отмечалась существенная зависимость вероятности появления ДСП и от фазы цикла солнечной активности, и от сезона. В то же время, в отношении сезонной зависимости не вероятности появления, а длительности наблюдения ДСП в течение суток, результаты [Potapov et al., 2014; Полюшкина и др., 2015] вполне согласуются с результатами работ [Yahnin et al., 2003; Molchanov et al., 2004]. И в тех, и в других отмечалась сильная сезонная вариация длительности излучения ИАР с максимумом зимой и минимумом летом. Эти расхождения и, наоборот, совпадения результатов в разных исследованиях легко объясняются, на наш взгляд, условиями наблюдений и характеристиками использованной измерительной аппаратуры. Если наблюдения велись недостаточно чувствительными магнитометрами и/или в зашумленном помехами месте, то слабые и короткие по длительности участки ДСП были просто неразличимы в силу малости своей амплитуды. Это вызывало кажущийся эффект полного отсутствия излучения в летнее время, особенно во время солнечного максимума, когда к искусственным шумам добавляются помехи естественного происхождения, вызванные магнитной возмущенностью. В такие периоды отношение сигнал/шум опускалось до минимальных значений. Высокочувствительная аппаратура с надлежащей фильтрацией низкочастотных шумов позволяла выявить наличие ДСП даже в условиях умеренной возмущенности в максимуме солнечной активности, и лишь при очень высокой возмущенности полосы излучения ИАР экранировались иррегулярным шумом. Но когда в ионосфере складываются условия, при которых энергия запертых в резонаторе волн уже не может проникать к Земле (это происходит в дневное время

вдали от зимнего солнцестояния), даже чувствительные магнитометры оказываются бессильны и их результаты совпадают с измерениями менее чувствительных приборов.

Есть разные точки зрения на причины отсутствия излучения в летнее дневное время и в максимуме солнечного цикла. Беляев и др. [1997] считают, что в период высокой солнечной активности резко снижается добротность резонатора. Причина — плавный спад плотности плазмы на верхней границе резонатора за счет интенсивной солнечной радиации и потоков энергичных частиц. Это размывает имеющийся там максимум альвеновской скорости. В дневное время в нижних слоях ионосферы возрастает поглощение волн. Обе границы теряют способность эффективно отражать волны, и резонансные свойства полости исчезают. Аналогичной точки зрения придерживаются авторы работы [Nosé et al., 2017]. По результатам своих наблюдений на низкоширотной станции Мурото они обнаружили отчетливый суточный ход вероятности появления ДСП с плато в ночные и ранние утренние часы и резким спадом в 05–06 LT. Сезонный ход на этой станции довольно неровный и имеет размытый максимум с мая по сентябрь. Обе зависимости авторы объясняют изменениями добротности ИАР и вариациями источника генерации волн, захватываемых резонатором, — глобальной грозовой активности. С таким объяснением сезонного хода можно, пожалуй, согласиться. Но причиной столь резкой суточной вариации частоты появления ДСП едва ли можно считать изменение добротности, поскольку по оценкам самих авторов она меняется в течение суток не более чем на 40 %. В работе [Molchanov et al., 2004] отсутствие излучения летом в дневное время объясняется суточным ходом другого возможного источника — нейтрального ветра на высоте E-слоя ионосферы, скорость которого минимальна весной и в начале лета.

В работах [Potapov et al., 2014; Полюшкина и др., 2015] сезонные вариации суточной продолжительности ДСП были сопоставлены с продолжительностью затенения ионосферных слоев D (высота $H$=70 км), E ($H$=110 км), F2 ($H$ принята равной 200 км) над обсерваторией Монды, где выполнялись наблюдения. Сравнение вариаций показало, что длительность ДСП оказывается ближе всего к длительности ночи в слое D. В весенние месяцы 2011 г. и осенние 2010 г. продолжительность ДСП в среднем совпадает с длительностью ночи на высоте этого слоя. Однако зимой и весной ИАР работает на несколько часов дольше [Полюшкина и др., 2015]. Изменение местного времени начала излучения в зависимости от сезона показано на рис. 5 (слева) темными, его окончания — светлыми кружками. Верхняя штриховая линия отображает время восхода Солнца в зависимости от сезона на высоте ионосферного слоя D над обсерваторией, нижняя — время захода на той же высоте. Видно, что излучение ИАР — в основном ночное явление; ДСП наблюдаются по большей части во время затенения нижней ионосферы, хотя иногда, особенно в зимние месяцы, при небольшом возвышении Солнца над горизонтом, излучение начинается и заканчивается соответственно до заката и после восхода, захватывая по 5–6 ч светлого времени. Для широты обсерватории Монды это дни декабря и января.

Таким образом, есть все основания считать длительность затенения нижней ионосферы основным фактором, влияющим на продолжительность излучения ИАР, наблюдаемого на Земле. Это подтверждает рис. 5 (справа), где показана зависимость длительности ДСП в течение суток от продолжительности затенения слоя D. Этот результат кажется удивительным, поскольку полость резонатора не охватывает D-область. Но можно предположить, что наличие слоя D все же как-то модифицирует граничное условие на нижней стенке резонатора, и освещенность слоя влияет на процессы отражения, прохождения и поглощения волн в нижней части ионосферы. Остается, однако, неясным, приводит ли освещенность нижней ионосферы только к уменьшению ее прозрачности для альвеновских волн или же к их полному поглощению в ионосфере. В первом случае ИАР в дневное время продолжает удерживать волны, которые, однако, не могут просочиться на Землю; во втором случае волновая активность в резонаторе на время замирает. Ответ на этот вопрос могли бы дать спутниковые наблюдения на низких орбитах. Опубликованные на текущий момент данные измерений выглядят отрывочными и неоднозначными [Zhao, Ni, 2006; Dudkin et al., 2014; Surkov, Pilipenko, 2016]. Одно из возможных объяснений отсутствия надежных наблюдений излучения ИАР в ионосфере приведено в работе [Pilipenko et al., 2017]. Тем не менее, есть свидетельства спутниковых наблюдений похожих на ДСП структур, хотя и ночью, но в освещенной ионосфере в высокоширотной области [Chaston et al., 2002], а также днем в низкоширотной ионосфере [Simões et al., 2012]. Во второй из указанных работ частотный диапазон спектральных полос намного шире, чем по наземным наблюдениям — от одного до двадцати–тридцати герц.

### 3.4. Особенности спектрограмм излучения ИАР

В большинстве случаев ДСП ИАР наблюдаются в обеих горизонтальных компонентах. Вертикальная компонента редко используется для изучения ИАР, хотя следы излучения наблюдаются и там. Интенсивности излучения по меридиональной и азимутальной компонентам на разных станциях могут различаться. Так, на Камчатке амплитуда излучения была значительно выше в азимутальной составляющей [Molchanov et al., 2004], в обсерватории Монды интенсивность полос обычно несколько выше в меридиональной компоненте [Potapov et al., 2014]. Такое различие может быть связано как с относительным положением грозовых источников, так и с разным характером подстилающей поверхности. В то же время соотношение яркости полос может меняться на одной станции от дня ко дню и даже в течение одних суток (рис. 6, *а*). Кроме того, поведение полос может довольно существенно различаться на спектрограммах разных компонент, вплоть до несовпадения числа полос (рис. 6, *б*). Довольно часто наблюдаются и другие аномалии в поведении ДСП:

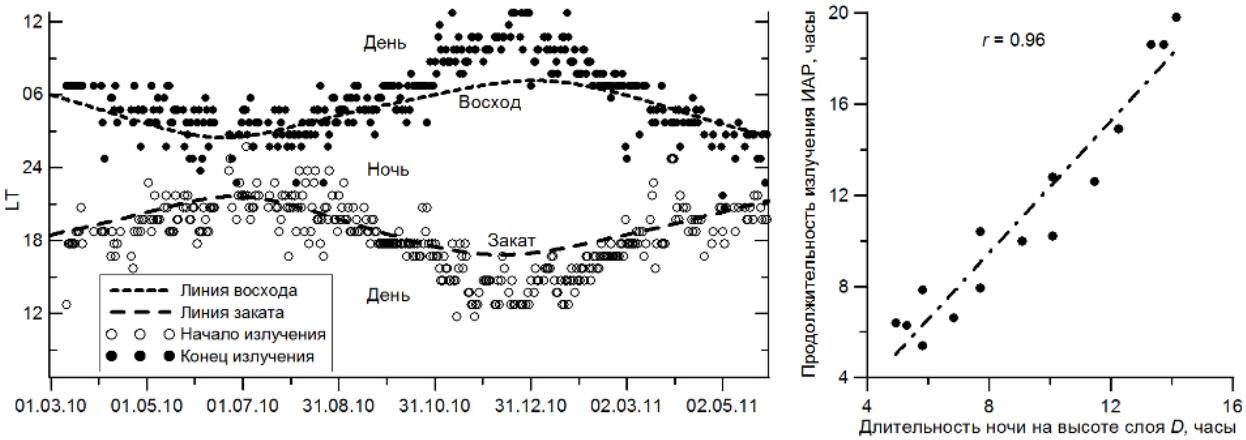


*Рис. 5.* Сезонная вариация длительности ДСП: изменение начала (светлые кружки) и окончания (темные кружки) излучения в зависимости от сезона (слева); зависимость длительности ДСП от продолжительности ночных условий в слое D (справа) [Potapov et al., 2014]

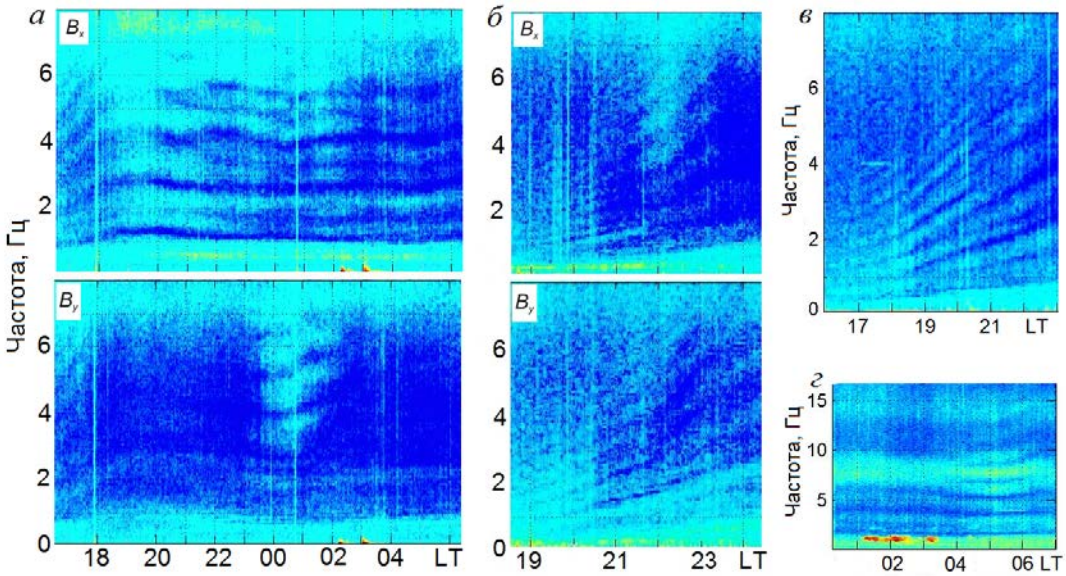


*Рис. 6.* Примеры аномального поведения ДСП излучения ИАР по данным наблюдений в обсерватории Монды: изменение соотношения интенсивности полос между компонентами в ходе суток 21–22.12.2009 (*а*); разное число полос в двух компонентах по наблюдениям 25.08.2017 (*б*); случай слияния и разветвления полос 19.09.2017 (*в*); взаимодействие колебаний ИАР и шумановского резонатора (*г*)

их слияние или наоборот, раздвоение и разветвление (рис. 6, *в*). В тех случаях, когда частота верхних гармоник превышает фундаментальную частоту (~8 Гц) резонатора Шумана Земля — ионосфера, наблюдаются интересные эффекты взаимодействия колебаний двух резонаторов (рис. 6, *г*). Все эти особенности с трудом поддаются объяснению на основе существующих моделей, однако некоторые из них удается понять путем учета реальной геометрии магнитного поля в модели плоскослоистой ионосферы. Так, в работе [Ермакова и др., 2008] выполнены модельные расчеты с учетом наклона геомагнитных силовых линий, позволившие объяснить некоторые аномалии в поведении ДСП: разный частотный масштаб резонансной структуры в меридиональной и азимутальной компонентах поля, наличие нескольких частотных масштабов ДСП и смещение основных частот полос в одной компоненте относительно другой.

Иногда разветвление ДСП приводит к появлению тонкой структуры излучения по частоте: каждая полоса распадается на несколько более тонких (рис. 7, см. также рис. 3 в работе [Ермакова и др., 2011]). При этом частотный масштаб полос тонкой структуры в 3–5 раз меньше, чем масштаб исходной структуры. Впервые тонкая структура была обнаружена на низких широтах (о-в Крит) и вначале считалась особенностью спектров ИАР именно на этих широтах [Bösinger et al., 2004]. Однако затем она была обнаружена и на средних широтах: на ст. Новая Жизнь [Ермакова и др., 2011], в обсерваториях Борок и Монды [Довбня и др., 2013а]. Излучение ИАР с очень малым значением частотного масштаба наблюдалось и на дальневосточных низких широтах — в Японии на ст. Мурото [Nosé et al., 2017]. Там типичная разность частот между соседними гармониками составляла в ночное время в максимуме и на спаде солнечного цикла около 0.25 Гц. В отличие от Bösinger

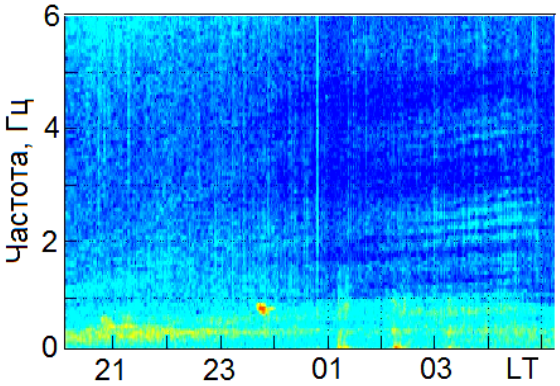


*Рис. 7.* Пример расщепления ДСП с образованием тонкой структуры (обсерватория Монды, 10–11.04.2010)

et al. [2004], авторы Nosé et al. [2017] не считают такое значение частотного масштаба гармоник признаком тонкой структуры. Действительно, на фазе максимума даже на средних широтах в дневное время частотный масштаб может сокращаться до 0.25 Гц. А на широте ст. Мурото, как показывают оценки авторов [Nosé et al., 2017], регулярные значения частотного масштаба могут опускаться даже ниже 0.18 Гц. В то же время, как видно на рис. 10, *а* той же работы, в другие дни того же периода наблюдений разность частот соседних гармоник могла быть намного выше (0.5–0.7 Гц), сравниваясь с частотным масштабом излучения на более высокоширотных японских станциях Нишияма и Окура. Примерно та же картина описана в работе [Bösinger et al., 2004]. Практически одновременно наблюдались полосы, разделенные просветом более 0.5 Гц, и их тонкая структура с масштабом порядка 0.12 Гц. Это может свидетельствовать в пользу гипотезы Ермаковой и др. [2011] о роли нелокальной ионосферы в появлении тонкой структуры: сигнал может приходить из удаленной области ионосферы с иными параметрами по сравнению с локальными.

Но в других случаях дополнительная структура появляется не в результате расщепления, а отдельно от основной картины излучения ИАР, обычно она обнаруживается под уходящей вверх нижней полосой основного излучения, как это видно на рис. 8 в работе [Довбня и др., 2013б]. Для объяснения этого явления высказано предположение о наличии, помимо основного резонатора ИАР, дополнительного надионосферного резонатора, в котором альвеновские волны захватываются на участке геомагнитных силовых линий, соединяющих верхнюю границу ИАР Северного полушария с верхней границей ИАР Южного полушария. Так же как и ИАР, надионосферный резонатор является открытым, так что энергия колебаний в нем может просачиваться к Земле, хотя весь он целиком находится в магнитосфере. Сделанные в работе [Довбня и др., 2013а] оценки собственных частот такого резонатора согласуются с наблюдениями. Характерные частоты лежат между частотами ИАР и собственными частотами МАР (магнитосферного альвеновского резонатора) [Пилипенко, 2003] (field-line resonator [Hasegawa, Chen, 1974; Southwood, 1974]).

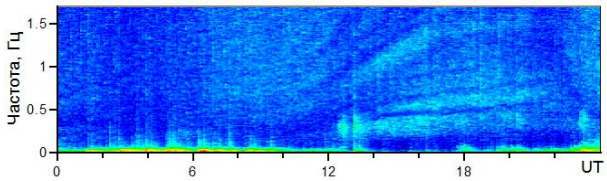


*Рис. 8.* Пример динамического спектра электромагнитных колебаний (обсерватория Монды, 06.09.2010), предположительно возбуждаемых в надионосферном резонаторе Альвена [Довбня и др., 2013б]

## 4. ПОТЕНЦИАЛ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ

Поскольку частота полос излучения ИАР и их частотный масштаб оказались напрямую связанными с ионосферными параметрами, то вскоре после обнаружения ИАР было предложено использовать эту связь для наземной диагностики ионосферы — ее центральной части (слой F2) [Yahnin et al., 2003; Колосков, Бару, 2012; Fedorov et al., 2016c] и верхних областей [Belyaev et al., 1990].

Что касается слоя F2, имеются многочисленные экспериментальные подтверждения [Parent et al., 2010; Колосков, Бару, 2012; Potapov et al., 2014, 2017; Potapov, Polyushkina, 2020a] тесной связи резонансных частот и частотного масштаба ИАР с критической частотой $f_o$F2 радиозондирования ионосферы, а значит, и с электронной концентрацией в максимуме этого слоя $N_e = 1.24 \cdot 10^4 (f_o\mathrm{F2})^2$, здесь $N_e$ измеряется в см$^{-3}$, а критическая частота — в МГц. Простейшая модель (1) ИАР предполагает, что фундаментальная частота резонатора определяется временем пробега волны между основанием ионосферы и перегибом альвеновской скорости на высоте 1–3 тыс. км. При этом основной вклад вносит время прохождения того участка траектории волны, где альвеновская скорость $c_A = B/\sqrt{4\pi m_{ieff} N_e}$ минимальна. Этот участок совпадает с максимумом высотного профиля $N_e$, поскольку магнитное поле $B$ и эффективная масса ионов $m_{ieff}$ меняются намного медленнее резкого изменения ионизации вблизи ее максимума.

На рис. 9 показана экспериментально измеренная в обсерватории Монды зависимость частотного масштаба $\Delta f$ ДСП от $N_e$ в максимуме слоя F2. Значения $N_e$ рассчитывались по измерениям $f_o$F2, полученным с помощью цифрового ионозонда [Potapov et al., 2014]. Коэффициент линейной корреляции между $\Delta f$ и $N_e^{-1/2}$ составил $r = 0.88$ для всего объема из 99 измерений, сделанных в разные месяцы 2010–2011 гг.

В работе [Potapov et al., 2017] на материале одновременных средне- и высокоширотных наблюдений излучения ИАР была детально проанализирована корреляция суточных вариаций обратной критической частоты $(f_o\mathrm{F2})^{-1}$ ионосферы с вариациями резонансных частот $f_i$ и частотным масштабом $\Delta f$ ИАР. Коэффициент корреляции достигал в отдельных случаях 0.99, не опускаясь ниже 0.88. Это могло бы

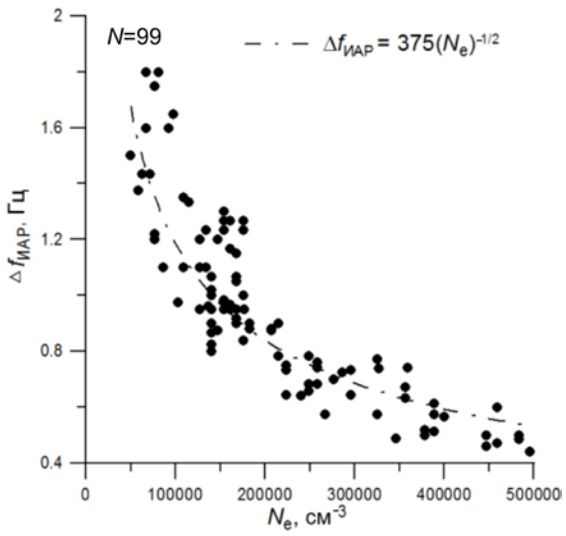


*Рис. 9.* Зависимость частотного масштаба $\Delta f$ ДСП от электронной концентрации $N_e$ в максимуме слоя F2

позволить точно отслеживать суточные изменения электронной концентрации в максимуме ионизации ионосферы на основе простейшего анализа спектрограмм излучения ИАР, т. е., путем измерения частот $f_i$ спектральных полос ИАР или расстояния $\Delta f$ между ними. Однако в реальности делать это пока не удается по той причине, что параметры связи между $(f_oF2)^{-1}$ и $f_i$, а также $\Delta f$, существенно меняются от суток к суткам. Например, по данным [Potapov et al., 2017] средние отклонения коэффициента наклона линейной регрессии между вариациями этих величин могут достигать 36 %.

Это говорит о том, что стандартная модель ИАР оказалась недостаточно адекватной для точного объяснения наблюдаемой связи между вариациями критической частоты слоя F2 ионосферы и измеряемыми спектральными параметрами излучения ИАР. Другие, более сложные модели, краткий обзор которых дан выше, не решают проблему, поскольку все они основаны на схеме, объясняющей наблюдаемые ДСП действием резонатора. Это как раз и приводит к тесной зависимости $\Delta f$ от $f_oF2$, однако сама по себе эта схема не может объяснить неожиданных изменений характеристик этой зависимости. К изменению наблюдаемых частот может привести изменение геометрии резонатора, например вариации дипольной структуры [Lysak et al., 2013] или наклона силовых линий геомагнитного поля [Ермакова и др., 2008], но эти факторы существенно не меняются ото дня ко дню или от часа к часу. Чтобы выявить возможные причины скачков регрессионных коэффициентов зависимости $\Delta f(f_{cr})$ требуются дополнительные теоретические разработки.

В работе [Potapov, Polyushkina, 2020a] использован другой метод оценки электронной концентрации в ионосфере на основе наземных измерений без привлечения радиозондирования, которое иногда, особенно на высоких широтах, не дает результатов из-за авроральных возмущений. Предложено использовать многофакторный регрессионный анализ с привлечением, помимо частотных параметров ДСП ИАР, дополнительных предикторов. Ими могут быть индексы магнитной и солнечной активности, местное время, сезонный фактор, определяющий длительность затенения ионосферы в данные сутки и т. д. Привлекаются также прогнозы критической частоты и минимальной альвеновской скорости в слое F2, полученные с помощью ионосферной модели IRI-2012. В результате можно получить более точную оценку электронной концентрации по сравнению с предсказываемой той же моделью IRI-2012.

Определенные успехи достигнуты и в использовании измерений частотных параметров ДСП для диагностики верхней ионосферы. О принципиальной возможности такой диагностики заявляли авторы работы [Belyaev et al., 1990]. Практическая попытка получить сведения о параметрах верхней ионосферы с помощью ИАР была предпринята лишь четвертью века позже в работе [Потапов и др., 2016].

Использовались данные измерений в среднеширотной обсерватории Монды и высокоширотной обсерватории Соданкюля. Решалась обратная задача восстановления высотных профилей ионов на высотах от 2000 до 6000 км по результатам сопоставления частотного масштаба излучения ИАР, измеренного по спектрограммам ДСП и вычисленного на основе модели IRI-2012, экстраполированной до высоты 10 000 км. В отличие от однородной модели (1), используемой при диагностике электронной концентрации в слое F2, учитывалось непрерывное изменение магнитного поля $B(l)$, эффективной массы ионов $m_{ieff}(l)$ и электронной плотности $N_e(l)$, где $l$ — расстояние вдоль продольной оси резонатора. Частотный масштаб гармоник излучения при этом имеет вид

$$\Delta f = \left( \int_{l_1}^{l_2} \frac{\sqrt{4\pi m_{ieff}(l) N_e(l)}}{B(l)} dl \right)^{-1}, \qquad (3)$$

где $l_1$ и $l_2$ — положение нижней и верхней стенок резонатора соответственно. Значения всех параметров рассчитывались до высоты $l^*$=2000 км на основе модели IRI-2012, а выше 2000 км (до 10 000 км) — на основе интерполяционной формулы, аналогичной использованной в работе [Lysak, 2004],

$$N_i(l) = N_{O^+} e^{-b_1(l-l^*)} + N_{He^+} e^{-b_2(l-l^*)} + N_{N^+} e^{-b_3(l-l^*)} + N_{H^+} \left( \frac{l^* + R_E}{l + R_E} \right)^p; \; N_e(l) = N_i(l);$$

$$m_{ieff}(l) = \frac{1}{N_e(l)} \times \left[ 16 N_{O^+} e^{-b_1(l-l^*)} + 4 N_{He^+} e^{-b_2(l-l^*)} + 14 N_{N^+} e^{-b_3(l-l^*)} + N_{H^+} \left( \frac{l_* + R_E}{l + R_E} \right)^p \right].$$

Здесь $N_{O+}$, $N_{He+}$, $N_{N+}$, $N_{H+}$ — концентрации 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); $m_{\mathrm{ieff}}$ измеряется в единицах а.е.м. Коэффициенты в формулах экстраполяции подбирались так, чтобы минимизировать отклонение вычисленного по формуле (3) значения $\Delta f_{\mathrm{calc}}$ от измеренного значения $\Delta f_{\mathrm{meas}}$. Для этого численно решалась задача поиска минимума функции $\mathrm{F}(b_1, b_2, b_3)=|\Delta f_{\mathrm{calc}}-\Delta f_{\mathrm{meas}}|$. Идея состоит в том, что оптимизированные таким образом коэффициенты дадут высотные профили ионов, наиболее близкие к реальным. Конечно, как всякая обратная задача, она может допускать неоднозначные решения. Поэтому необходимо накладывать на отбираемые решения дополнительные условия и ограничения. Например, таким дополнительным требованием может быть условие положительной производной функции, описывающей профиль относительной концентрации протонов на верхней границе рассматриваемой области.

В результате в работе [Потапов и др., 2016] были получены высотные профили содержания и абсолютной концентрации ионов кислорода, водорода и гелия; прослежены изменения вычисленных профилей при переходе от дневного времени к ночному (рис. 10). Видно, например, что над обсерваторией Монды относительное содержание ионов кислорода на высоте более 2000 км в любое время суток не превышает 35 % и резко падает с дальнейшим увеличением высоты. В то же время на высоких широтах в ранние вечерние часы оно снижается от значения более 70 % на высоте 2000 км до 20 % на высоте 4000 км, при этом убывая с приближением к ночи. Интересно, что максимальное содержание ионов кислорода в 2–4 раза выше в Соданкюля, чем в Мондах. Время достижения этого максимума сдвигается с 16 LT в авроральной зоне до 20 LT в среднеширотной обсерватории.

## 5. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ

В одном из разделов выше мы обсуждали воздействие на излучение ИАР сезонных и суточных изменений, а также влияние солнечной и магнитной активности. Однако имеются и другие внешние факторы, влияющие на режим ИАР. Одним из них неожиданно оказалось направление вектора межпланетного магнитного поля (ММП). В работе [Guglielmi, Potapov, 2017] высказано предположение, что запитка ИАР энергией может происходить не только снизу (грозы, нейтральные ветры и т. д.), но и сверху падающими из магнитосферы и даже из межпланетной среды электромагнитными волнами. В указанной статье приводятся результаты косвенной проверки высказанной гипотезы.

Исходные предпосылки заключаются в следующем. Как известно, перед фронтом околоземной ударной волны существует так называемый форшок. Он занимает область, ограниченную фронтом ударной волны и силовой линией, касающейся его. Форшок формируется силовыми линиями ММП, пронизывающими фронт. Вдоль этих линий движутся отраженные от него частицы, возбуждая колебания в диапазоне от миллигерц до нескольких килогерц, которые сносятся солнечным ветром на ударный фронт. Часть из них может проникать дальше в магнитосферу и вдоль геомагнитных силовых линий попадать на верхнюю стенку ИАР. В меридиональной плоскости положение форшока относительно экватора зависит от соотношения между вертикальной $B_z$ и радиальной $B_x$ компонентами ММП. Если в солнечно-магнитосферной системе координат произведение $B_xB_z>0$, область форшока оказывается в основном выше экватора, при $B_xB_z<0$ — ниже. Соответственно, можно предположить, что в первом случае электромагнитные волны, возбужденные в области форшока, будут проникать преимущественно в Северное полушарие, во втором — в Южное. Имея данные наблюдений активности ИАР в обсерватории Северного полушария, можно экспериментально проверить, действительно ли активность колебаний ИАР выше при $B_xB_z>0$, чем при $B_xB_z<0$.

Для проверки гипотезы использовались данные наблюдения УНЧ-колебаний в обсерватории Монды с 01.03.2010 по 31.05.2011 [Guglielmi, Potapov, 2017]. Считалось, что в данный день наблюдается излучение ИАР, если на суточной спектрограмме имелся как минимум пятичасовой интервал ясно различимых ДСП (в отличие от двухчасового критерия, принятого для построения распределения на рис. 5 данного обзора). Подсчет показал, что излучение наблюдалось 297 дней из общего числа (457 дней). Тогда оценка вероятности появления излучения $p=0.65$. Далее наблюдения ИАР сопоставлялись со среднесуточными значениями компонент ММП $B_x$ и $B_z$, взятыми из базы данных OMNIWEB [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html] для каждого дня с 01.03.2010 по 31.05.2011. С учетом отброшенных 28 дней с нулевыми значениями $B_x$ или $B_z$ окончательная выборка составила 429 дней. Случаи $B_xB_z>0$ и $B_xB_z<0$ составляют 194 дня и 235 дней соответственно. Таким образом, вероятности появления ИАР равны $p_1=0.73$ при $B_xB_z>0$ и $p_2=0.59$ при $B_xB_z<0$. С учетом объема выборки среднеквадратическая ошибка вычисления $p$ составляет $s=0.024$. Следовательно, разность вероятностей наблюдения излучения ИАР в Северном полушарии $\Delta p=p_1-p_2=0.14$ при северном ($p_1$) и южном ($p_2$) расположении форшока почти в шесть раз превышает среднеквадратическую ошибку; правило трех сигма с запасом выполняется. Поэтому вывод о воздействии ориентации ММП на активность ИАР следует признать статистически достоверным. Конечно, различие между $p_1$ и $p_2$ сравнительно невелико. Скорее всего, это следствие того, что внемагнитосферные источники, возбуждающие ИАР, действуют совместно с более мощными источниками, располагающимися в атмосфере и в нижней ионосфере.

Альтернативное объяснение состоит в том, что флуктуации, проникающие в магнитосферу извне, не поставляют энергию для запитки ионосферного резонатора, а служат лишь триггерами, высвобождающими свободную энергию, запасенную в резонаторе, который находится в метастабильном состоянии. Для такого объяснения есть некоторые основания. Например, электромагнитные импульсы индустриального происхождения время от времени

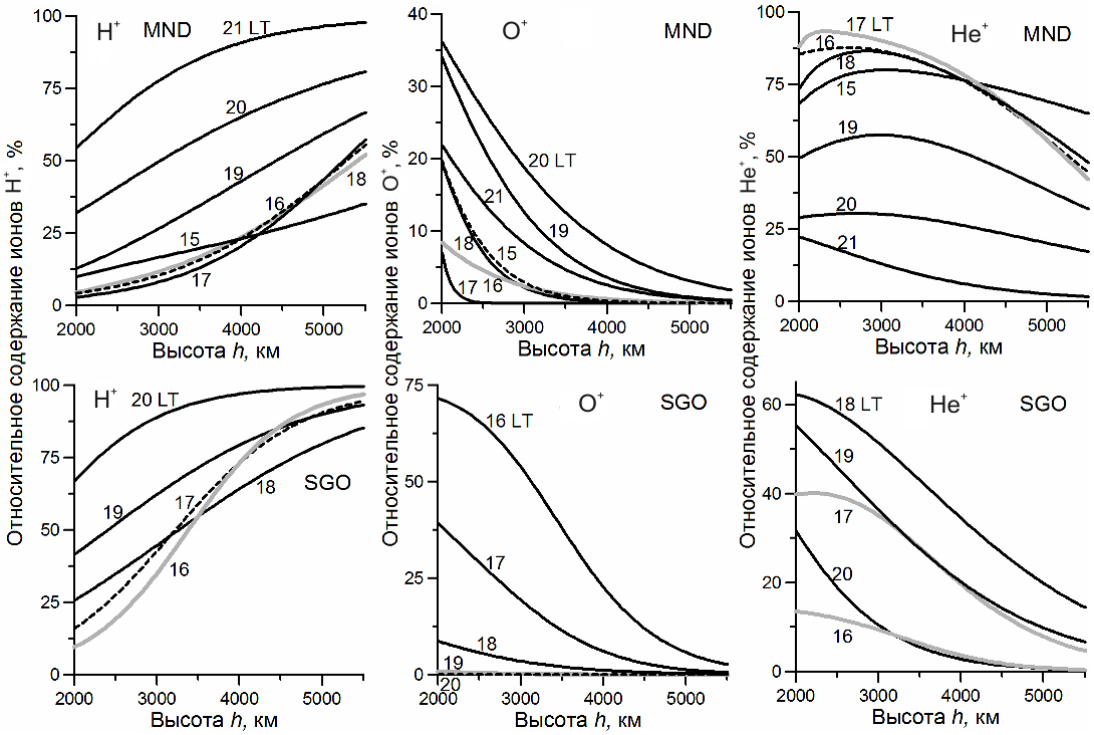


*Рис. 10.* Оценки высотных профилей относительного содержания ионов водорода, кислорода и гелия над обсерваториями Монды (MND) и Соданкюля (SGO), полученные на основе анализа спектрограмм излучения ИАР [Потапов и др., 2016]

воздействуют на ИАР как своего рода триггеры. В работе [Гульельми и др., 2011] приведены примеры резкого усиления и, наоборот, внезапного исчезновения излучения ИАР в моменты начала часа по мировому времени (эффект часовых меток — ЧМ). Ясно, что сами по себе эти ЧМ не имеют никакого отношения к естественным процессам во внешней среде. Однако они являются своего рода тактовыми сигналами, синхронизирующими работу технологических систем во всем мире. Физические механизмы импульсного воздействия техносферы на околоземную среду, ответственные за эффект ЧМ, ориентировочно указаны в работах [Samadani et al., 1981; Guglielmi, Zotov, 2007; Zotov, Guglielmi, 2010].

Хотя статистически магнитная возмущенность слабо влияет на частоту появления излучения ИАР, в частных событиях, особенно в авроральных условиях, внезапные ионосферные возмущения, связанные с магнитосферными явлениями, могут существенно влиять на частотный и амплитудный режим ИАР [Semenova, Yahnin, 2005, 2014; Semenova et al., 2008]. В работе [Parent et al., 2010] подробно проанализировано событие 28.02.2006. Привлекались одновременные данные индукционного магнитометра обсерватории Гакона (см. таблицу) и расположенных в непосредственной близости инструментов HAARP — дигизонда, риометра и камеры всего неба. Примерно с 16 LT ДСП на спектрограмме магнитометра вели себя обычным образом, возрастая по частоте в соответствии с вечерним падением критической частоты ионосферы, измеряемой дигизондом. С началом суббури в 22 LT ДСП исчезли то ли вследствие подавления резонансных условий суббурей в связи с высыпанием частиц, то ли из-за «засветки» спектром мощных колебаний в диапазоне Pc1/Pi1B. После суббури ДСП снова появились, но гармоники сдвинулись на более низкие частоты с одновременным уменьшением частотного масштаба. Как показали расчеты, это произошло благодаря резкому увеличению электронной концентрации в слое F2, вызванному суббуревым высыпанием электронов.

Другими примерами внешнего воздействия на излучение ИАР являются случаи, когда сравнительно слабый акустический импульс от землетрясения приводил к резкому изменению режима возбуждения ИАР [Guglielmi et al., 2006]. В ряде случаев в момент прихода сейсмических волн от землетрясения происходила интенсификация излучения, проявляющаяся в резком усилении яркости ДСП; в других случаях происходил срыв излучения и гармоническая структура полос исчезала [Потапов и др., 2008]. Авторы работы [Grimalsky et al., 2010] сообщали о предвестниках землетрясения в виде ионосферных возмущений, проявившихся и в появлении излучения ИАР. Для объяснения причин таких воздействий сейсмической активности на режим ионосферного альвеновского резонатора привлекаются хорошо известные в литературе факты отклика ионосферы на процессы подготовки землетрясений и сами землетрясения посредством акустических, электромагнитных, электростатических возмущений, распространяющихся вверх от сейсмического очага (см. [Потапов и др., 2008]).

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы описали результаты исследования такого интересного геофизического объекта, как ионосфер-

ный альвеновский резонатор, уделяя внимание в основном морфологическим характеристикам и их физической интерпретации. В комплексе эти результаты показывают, что ИАР является самостоятельной структурой магнитосферно-ионосферной системы Земли и играет важную роль во взаимодействии между двумя основными частями системы — магнитосферой и ионосферой. Излучение ИАР — это перманентное глобальное явление, характеристики которого, определяемые локальными параметрами ионосферы, зависят от местного времени и географического положения. Как и на всю ионосферу, на ИАР оказывают влияние внешние воздействия, как сверху (солнечная активность, высыпания частиц из магнитосферы), так и снизу (сейсмическая активность, грозы, нейтральные ветры). Часть этих внешних воздействий служит источником энергии для резонансных колебаний. Основными источниками являются, по-видимому, грозовая активность и ветры в верхней атмосфере, но, возможно, свой вклад вносит и поток электромагнитного излучения из магнитосферы и межпланетной среды.

Тесная связь характеристик излучения ИАР с параметрами ионосферы определяет существенный потенциал использования измерений частотной структуры резонатора для наземной диагностики как электронной концентрации в слое F2 ионосферы, так и высотного профиля ионного состава над ионосферой до высоты 4–6 тыс. км. Мы вполне допускаем, что подобно полному электронному содержанию, ставшему в последние десятилетия одним из основных индексов состояния ионосферно-магнитосферной системы, частотный масштаб $\Delta f$ излучения ИАР также будет широко использоваться в ионосферных исследованиях.

Отдельно следует сказать об отчетливой частотной и амплитудной модуляции излучения ИАР. Особенно впечатляет частотная вариация, проявляющаяся на спектрограмме в виде яркой веерообразной структуры ДСП. В данном обзоре основное внимание мы уделили амплитудным вариациям излучения. В работе [Potapov, Polyushkina, 2020b] подробно рассмотрены три вида частотной модуляции: суточная, сезонная и солнечно-циклическая. Вариации и частоты, и амплитуды излучения вызваны изменениями локальных свойств ионосферы. Основными факторами, влияющими на амплитудно-частотный режим ИАР, являются электронная концентрация в F2-области, определяющая частоту гармоник, проводимость в нижней части ионосферы, влияющая на добротность резонатора и условия прохождения волн к земной поверхности, и высотный профиль плотности электронов и ионов, задающий вместе с ионным составом профиль альвеновской скорости вдоль оси резонатора. Как отмечено в работе [Гульельми, Потапов, 2021], глубокого физического смысла модуляция излучения ИАР не имеет. Просто наблюдатель, совершая суточное вращение вместе с сопряженной локальной частью ИАР, ощущает влияние суточных изменений солнечной радиации на состояние ионосферы. На это могут накладываться воздействия изменений солнечной активности и, особенно в высоких широтах, магнитные возмущения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь мы обратим внимание на нерешенные еще вопросы в исследованиях ИАР. Если касаться возможностей практического применения информации о частотной структуре ДСП для диагностики ионосферной плазмы, то основной проблемой является отсутствие теоретического объяснения межсуточных скачков численных параметров связи между характеристиками излучения и состоянием ионосферы. Если в пределах одних суток обычно сохраняется устойчивая и тесная связь между частотным масштабом $\Delta f$ излучения ИАР и электронной концентрацией $N_e$ в слое F2 ионосферы, то при переходе от одних суток к следующим параметры этой связи могут существенно меняться. При этом корреляция между $\Delta f$ и $N_e$ внутри следующих суток остается высокой. Требуется выяснить, какие факторы влияют на характер зависимости $\Delta f$ от $N_e$ в дополнение к факторам, учитываемым в имеющихся моделях.

Нельзя пока признать удовлетворительными имеющиеся в литературе объяснения аномалий, встречающихся в поведении ДСП: различие в частотной структуре разных компонент излучения, слияние или раздвоение полос. Не до конца ясен и вопрос о тонкой структуре полос. Требуются дополнительные синхронные измерения в нескольких регионах, чтобы, например, подтвердить или опровергнуть гипотезу о нелокальной ионосфере для объяснения тонкой структуры.

Мало пока спутниковых измерений излучения ИАР, особенно сопряженных с наземными наблюдениями. Совместные наблюдения в ионосфере и на Земле могли бы разрешить ряд вопросов по условиям прохождения волн к земной поверхности и их отражению от нижней границы резонатора и более точно определить положение этой границы. В частности, авторы работы [Potapov et al., 2021] обратили внимание на то, что частоты гармоник, имеющих узел электрического (и пучность магнитного) поля внизу (рис. 1, слева), образуют ряд нечетных чисел 1, 3, 5, 7 и т. д., и предположили, что только такие моды могут наблюдаться на земле. Гармоники же с частотами, пропорциональными ряду натуральных чисел 1, 2, 3, 4 (рис. 1, справа) могут наблюдаться лишь в ионосфере, они не проникают к земле. Проверить эту гипотезу можно, сравнив наблюдения ДСП на земле и на спутнике, находящемся в ионосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Вклад А.С. Потапова и Т.Н. Полюшкиной частично поддержан грантом РФФИ № 19-05-00574. Работа Б. Цэгмэда поддержана грантом АН Монголии ШУАГ-2017/17 и проектом Министерства образования, науки и спорта Монголии ШУСС-2017/65. Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» [http://ckp-rf.ru/ckp/3056]. Выражаем благодарность А.В. Гульельми за интерес к работе над данным обзором. Авторы признательны Б.В. Довбне и Б.И. Клайну за полезные обсуждения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


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.

Беляев П.П., Поляков С.В., Ермакова Е.Н., Исаев С.В. Экспериментальные исследования ионосферного альвеновского резонатора по наблюдениям электромагнитного шумового фона в солнечном цикле 1985–1995 гг. *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. 1997. Т. 40, № 10. С. 1305–1319.

Гохберг М.Б. Новый тип электромагнитной эмиссии в диапазоне короткопериодных геомагнитных колебаний. *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 359, № 4. С. 543.

Гульельми А.В., Потапов А.С. Частотно-модулированные ультранизкочастотные волны в околоземном космическом пространстве. *УФН*. 2021. Т. 191, № 5. С. 475–491. DOI: 10.3367/UFNr.2020.06.038777.

Гульельми А.В., Довбня Б.В., Потапов А.С., Хаякава М. Эффект часовых меток в активности электромагнитных колебаний Pc1 как свидетельство антропогенного воздействия на ионосферу и магнитосферу. *Солнечно-земная физика*. 2011. Вып. 19. С. 88–92.

Довбня Б.В., Гульельми А.В., Потапов А.С., Клайн Б.И. О существовании надионосферного резонатора Альфвена. *Солнечно-земная физика*. 2013а. Вып. 22. С. 12–15.

Довбня Б.В., Гульельми А.В., Потапов А.С., Рахматулин Р.А. Дополнительный резонатор для ультранизкочастотных волн. *Геофизические исследования*. 2013б. Т. 14, № 2. С. 49–58.

Довбня Б.В., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Динамика ионосферных альвеновских резонансов (ИАР) с конца 21 по 24 цикл солнечной активности. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019а. Т. 59, № 1. С. 39–49. DOI: 10.1134/S0016794019010061.

Довбня Б.В., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Влияние суббуревой активности на формирование шумовых УНЧ-излучений в диапазоне частот 0–7 Гц. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019б. Т. 59, № 3. С. 325–332. DOI: 10.1134/S0016794019030076.

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.

Ермакова Е.Н., Поляков С.В., Семенова Н.В. Исследование тонкой структуры в спектре фонового низкочастотного шума на средних широтах. *Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXIV Annual Seminar. Apatity*. 2011. P. 147–150.

Колосков А.В., Бару Н.А. Определение критической частоты F-слоя по данным наблюдений ионосферного альфвеновского резонанса. *Украинский антарктический журнал*. 2011–2012. № 10-11. С. 114–120.

Пилипенко В.А. Ультранизкочастотные волны в космосе и на Земле. *Очерки геофизических исследований: к 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта*. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С. 216–228.

Полюшкина Т.Н., Довбня Б.В., Потапов А.С. и др. Частотная структура спектральных полос ионосферного альвеновского резонатора и параметры ионосферы. *Геофизические исследования*. 2015. Т. 16. № 2. С. 39–57.

Поляков С.В. О свойствах ионосферного альвеновского резонатора. *Тезисы докладов Симпозиума КАПГ по солнечно-земной физике. Часть 3*. М.: Наука, 1976. С. 72–73.

Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альвеновский резонатор. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1981. Т. 21. № 5. С. 816–822.

Потапов А.С., Довбня Б.В., Цэгмед Б. О воздействии землетрясений на ионосферные резонансы Альвена. *Физика Земли*. 2008. № 4. С. 93–96.

Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Ойнац А.В. и др. Первый опыт оценки ионного состава над ионосферой по данным о частотной структуре излучения ИАР. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 2. С. 192–202. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-192-202.

Baru N., Koloskov A., Yampolsky Y., Rakhmatulin R. Multipoint observations of Ionospheric Alfvén Resonance. *Adv. Astron. Space Phys*. 2016. Vol. 6, no. 1. P. 45–49. DOI: 10.17721/2227-1481.6.45-49.

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Y. Theory for the formation of resonance structure in the spectrum of atmospheric electromagnetic background noise in the range of short-period geomagnetic pulsations. *Radiophys. Quantum Electron*. 1989. Vol. 32, no. 7. P. 594–601.

Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Yu. The ionospheric Alfvén resonator. *J Atmos. Terr. Phys*. 1990. Vol. 52, no. 9. P. 781–788.

Belyaev P.P., Bösinger T., Isaev S.V., Kangas J. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res*. 1999. Vol. 104, iss. A3. P. 4305–4317. DOI: 10.1029/1998JA900062.

Bösinger T., Haldoupis C., Belyaev P.P., et al. Special properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station ($L = 1.3$). *J. Geophys. Res*. 2002. Vol. 107, A10. P. 1281–1289. DOI: 10.1029/2001JA005076.

Bösinger T., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y. Fine structure in ionospheric Alfvèn resonator spectra observed at low latitude ($L = 1.3$). *Geophys. Res. Lett*. 2004. Vol. 31, L18802. DOI: 10.1029/2004GL020777.

Chaston C.C., Bonnell J.W., Carlson C.W., et al. Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res*. 2002. Vol. 107, no. A11. P. 1413. DOI: 10.1029/2002JA009272.

Demekhov A.G., Belyaev P.P., Isaev S.V., et al. Modelling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc1 frequency range. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2000. Vol. 62. P. 257–265. DOI: 10.1016/S1364-6826(99)00119-4.

Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V., et al. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2014. Vol. 117. P. 81–87. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.05.013.

Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Engebretson M. Interaction of magnetospheric Alfvén waves with the ionosphere in the Pc1 frequency band. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2016a. Vol. 121, no. 1. P. 321–337. DOI: 10.1002/2015JA021020.

Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Baddeley L. Modeling the high-latitude ground response to the excitation of the ionospheric MHD modes by atmospheric electric discharge. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2016b. Vol. 121, iss. 11. P. 11,282–11,301. DOI: 10.1002/2016JA023354.

Fedorov E., Mazur N., Pilipenko V., Ermakova E. Modeling diurnal variations of the IAR parameters. *Acta Geodaetica et Geophysica*. 2016c. Vol. 51, no. 4. P. 597–617. DOI: 10.1007/s40328-015-0158-9.

Grimalsky V., Kotsarenko A., Pulinets S., et al. On the modulation of intensity of Alfvén resonances before earthquakes: Observations and model. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2010. Vol. 72, no. 1. P. 1–6. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.09.017.

Guglielmi A.V., Potapov A.S. Influence of the interplanetary magnetic field on ULF oscillations of the ionospheric resonator. *Cosmic Res*. 2017. Vol. 55, no. 4. P. 248–252. DOI: 10.1134/S0010952517030042.

Guglielmi A., Zotov O. The human impact on the Pc1 wave activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2007. Vol. 69. P. 1753–1758.

Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B., et al. On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfven resonances. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2006. Vol. 31. P. 469–472.

Guglielmi A.V., Klain B.I., Potapov A.S. Discrete spectrum of ULF oscillations of the ionosphere. 2021. arXiv:2105.01871 [physics.geo-ph].

Hasegawa A., Chen L. Theory of magnetic pulsations. *Space Sci. Rev.* 1974. Vol. 16, no. 3. P. 347–359. DOI: 10.1007/BF00171563.

Hebden S.R., Robinson T.R., Wright D.M., et al. 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. DOI: 10.5194/angeo-23-1711-2005.

Ivanov N.V., Tereshchenko E.D., Tereshchenko P.E., Kopytenko Y.A. Features of resonance structures in natural electromagnetic noise spectra in the region of the main ionospheric trough. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2017. Vol. 57, no. 6. P. 752–760. DOI: 10.1134/S0016793217050097.

Lysak R.L. Feedback instability of the ionospheric resonant cavity. *J. Geophys. Res*. 1991. Vol. 96, no. A2. P. 1553–1568. DOI: 10.1029/90JA02154.

Lysak R.L. Magnetosphere–ionosphere coupling by Alfvén waves at midlatitudes. *J. Geophys. Res*. 2004. Vol. 109, A07201. DOI: 10.1029/2004JA010454.

Lysak R.L., Yoshikawa A. Resonant cavities and waveguides in the ionosphere and atmosphere. *Magnetospheric ULF Waves: Synthesis and New Directions. Geophys. Monograph Ser*. 2006. Vol. 169. P. 289–306. Washington: American Geophysical Union Publ., DC, USA, 2006.

Lysak R.L., Waters C.L., Sciffer M.D. Modeling of the ionospheric Alfvén resonator in dipolar geometry. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2013. Vol. 118, no. 4. P. 1514–1528. DOI: 10.1002/jgra.50090.

Molchanov O.A., Schekotov A.Yu., Fedorov E., Hayakawa M. Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: Results of observations at Kamchatka. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2004. Vol. 29. P. 649–655. DOI: 10.1016/j.pce.2003.09.022.

Nosé M., Uyeshima M., Kawai J., Hase H. Ionospheric Alfvén resonator observed at low-latitude ground station, Muroto. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2017. Vol. 122. P. 7240–7255. DOI: 10.1002/2017JA024204.

Parent A., Mann I.R., Rae I.J. Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res*. 2010. Vol. 115, iss. A2, CiteID A02312. DOI: 10.1029/2009JA014673.

Pilipenko V., Dudkin D., Fedorov E., et al. IAR signatures in the ionosphere: Modeling and observations at the Chibis-M microsatellite. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2017. Vol. 154. P. 217–225. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.12.012.

Pokhotelov O.A., Pokhotelov D., Streltsov A., et al. Dispersive ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res*. 2000. Vol. 105, no. A4. P. 7737–7746. DOI: 10.1029/1999JA900480.

Pokhotelov O.A., Khruschev V., Parrot S., et al. Ionospheric Alfvén resonator revisited: Feedback instability. *J. Geophys. Res*. 2001. Vol. 106, no. A11. P. 25813–258234. DOI: 10.1029/2000JA000450.

Pokhotelov O.A., Feygin F.Z., Khabazin Yu, et al. Observations of IAR spectral resonance at a large triangle of geophysical observatories. Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXVI Annual Seminar. Apatity: Kola, Science Center, Russian Academy of Science, 2003. P. 123–126.

Potapov A.S., Polyushkina T.N. Estimation of the ionosphere critical frequency without radio sounding. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2020a. Vol. 58, no. 7. P. 5058–5065. DOI: 10.1109/TGRS.2020.2972011.

Potapov A.S., Polyushkina T.N. Response of IAR frequency scale to solar and geomagnetic activity in solar cycle 24. *AIMS Geosciences*. 2020b. Vol. 6, no. 4. P. 545–560. DOI: 10.3934/geosci.2020031.

Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., et al. Emissions of ionospheric Alfvén resonator and ionospheric conditions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2014. Vol. 119. P. 91–101. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.07.001.

Potapov A.S., Polyushkina T.N., Tsegmed B., et al. Considering the potential of IAR emissions for ionospheric sounding. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2017. Vol. 164. P. 229–234. DOI: 10.1016/j.jastp.2017.08.026.

Potapov A.S., Guglielmi A.V., Klain B.I. Discrete spectrum of ULF oscillations of the ionosphere. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2021. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3092738.

Prikner K., Mursula K., Kangas J., et al. An effect of the ionospheric Alfvén resonator on multiband Pc1 pulsations. *Ann. Geophys*. 2004. Vol. 22. P. 643–651. DOI: 10.5194/angeo-22-643-2004.

Samadani R., Fraser-Smith A.C., Villard Jr. O.G. Possible change in natural Pc1 pulsation activity caused by BART. *J. Geophys. Res*. 1981. Vol. 86. P. 9211–9214. DOI: 10.1029/JA086iA11p09211.

Schekotov A., Pilipenko V., Shiokawa K., Fedorov E. ULF impulsive magnetic response at mid-latitudes to lightning activity. *Earth, Planets and Space*. 2011. Vol. 63. P. 119–128. DOI: 10.5047/eps.2010.12.009.

Sciffer M.D., Waters C.L. Propagation of ULF waves through the ionosphere: Analytic solutions for oblique magnetic fields. *J. Geophys. Res*. 2002. Vol. 107, no. A10. P. 1297. DOI: 10.1029/2001JA000184.

Sciffer M.D., Waters C.L., Menk F.W. A numerical model to investigate the polarisation azimuth of ULF waves through an ionosphere with oblique magnetic fields. *Ann. Geophys*. 2005. Vol. 23. P. 3457.

Semenova N.V., Yahnin A.G. Substorm effect on ground observations of signatures of the ionospheric Alfvén resonator. *Proc. International Conference on Substorms-8*. Univ. of Calgary, Banff, Canada. 2005.

Semenova N.V., Yahnin A.G. Sudden change in the resonance structure in the electromagnetic noise spectrum in the 0.1–10 Hz range during a substorm. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. Vol. 54, no. 3. P. 316–322. DOI: 10.1134/S0016793214030153.

Semenova N.V., Yahnin A.G., Vasil'ev A.N., Amm O. Specific features of resonance structures in spectra of ULF electromagnetic noise at high latitudes (Barentsburg Observatory). *Geomagnetism and Aeronomy*. 2008. Vol. 48. P. 36–44. DOI: 10.1007/s11478-008-1005-8.

Simões F., Klenzing J., Ivanov S., et al. Detection of ionospheric Alfvén resonator signatures in the equatorial ionosphere. *J. Geophys. Res*. 2012. Vol. 117, A11305. DOI: 10.1029/2012JA017709.

Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere. *Planet. Space Sci*. 1974. Vol. 22, no. 3. P. 483–491. DOI: 10.1016/0032-0633(74)90078-6.

Stanislawska I., Juchnikowski G., Gulyaeva T.L. Correlation distances based on ionospheric and geomagnetic catalogues. *Proc. STP-V Workshop. Hitachi, Japan*. 1997. P. 387–390.

Surkov V.V., Pilipenko V.A. Spectral signatures of the ionospheric Alfvén resonator to be observed by low-Earth orbit satellite. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2016. Vol. 121. P. 2783–2794. DOI: 10.1002/2015JA021912.

Surkov V.V., Pokhotelov O.A., Parrot M., Fedorov E.N., Hayakawa M. Excitation of the ionospheric resonance cavity by neutral winds at middle latitudes. *Ann. Geophys*. 2004. Vol. 22. P. 2877–2889. DOI: 10.5194/angeo-22-2877-2004.

Surkov V.V., Hayakawa M., Schekotov A.Y., Fedorov E.N., Molchanov O.A. Ionospheric Alfvén resonator excitation due to nearby thunderstorms. *J. Geophys. Res*. 2006. Iss. A1. CiteID A01303. DOI: 10.1029/2005JA011320.

Trakhtengertz V.Yu., Feldstein A.Ya. Turbulent regime of magnetospheric convection. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1987. Vol. 27. P. 221–228.

Trakhtengerts V.Yu., Feldstein A.Ya. Turbulent Alfvén boundary layer in the polar ionosphere. 1. Excitation conditions and energetic. *J. Geophys. Res*. 1991. Vol. 96, no. A11. P. 19363–19374.

Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., et al. 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. DOI: 10.5194/angeo-21-779-2003.

Zhao Z.Y., Ni B.B. Signatures of the ionospheric Alfvén resonator from AUREOL-3 ULF/ELF fluctuation measurements. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. Vol. 68. P. 191–201. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.10.009.

Zotov O.D., Guglielmi A.V. Diversity of geophysical manifestations of the ponderomotive forces. Proc. The 8th International Conference “Problems of Geocosmos”. St. Petersburg. Petrodvorets. 20–24 Sept. 2010. P. 294–299.

URL: https://omniweb.sci.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html (дата обращения 19 апреля 2021 г.).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html (дата обращения 19 апреля 2021 г.).

URL: http://ckp-rf.ru/ckp/3056 (дата обращения 19 апреля 2021 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Цэгмэд Б. Морфология и диагностический потенциал ионосферного альвеновского резонатора. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 2. С. 39–56. DOI: 10.12737/szf-73202104.