

О воздействии МГД-резонаторов на геомагнитные пульсации

© *Б. В. Довбня*¹, *А. С. Потапов*², *А. В. Гульельми*³, *Р. А. Рахматулин*², 2014

¹Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, п. Борок Ярославской обл., Россия

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

³Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Поступила 14 апреля 2014 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом.

Наведено приклади частотно-часової структури геомагнітних пульсацій. Показано, що пульсації різних типів можуть мати одну загальну особливість — дискретну структуру динамічного спектра. Дискретність проявляється у чергуванні «дозволених» і «заборонених» частот. Подібна структура пульсацій аналогічна періодичній структурі спектральних смуг, утворених МГД-резонаторами у магнітосферно-іоносферній плазмі. Поява дискретності у спектрі пульсацій пояснюється впливом фільтрувальних властивостей резонаторів на гідромагнітні хвилі під час їх проходження через резонансну порожнину. Передбачається, що в деяких випадках дискретність може дати корисну інформацію про канали поширення сигналів літосферного або магнітосферного походження.

Ключові слова: резонатори, геомагнітні пульсації, дискретна структура спектра.

Введение. Неравномерность пространственного распределения космической плазмы создает благоприятные условия для существования в околоземном пространстве структурных образований, играющих роль резонаторов для низкочастотных гидромагнитных волн. В 1980-е годы был теоретически предсказан, а затем и экспериментально обнаружен ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) [Поляков, Рапопорт, 1981; Беляев и др., 1987]. Его открытие — одно из замечательных достижений в физике ультранизкочастотных электромагнитных волн.

Естественное дополнение к ионосферному резонатору — физически связанный с ним надионосферный альвеновский резонатор (НИАР), проявляющийся на дискретных кратных частотах выше 0,15—0,3 Гц [Довбня и др., 2013а,б]. Его существование гармонически заполняет остававшийся свободным диапазон частот ниже основного резонанса ИАР. НИАР располагается вдоль магнитной силовой трубки над парой магнитосопряженных ИАР, его торцами служат верхние стенки ионосферных резонаторов Северного и Южного полушарий.

Теоретическому и экспериментальному исследованию ИАР посвящена обширная литература (см., например: [Остапенко, Поляков 1990; Lysak, 1991; Беляев и др., 1997; Belyaev et al., 1999; Demekhov et al., 2000; Pokhotelov et al., 2001; Böisinger et al., 2002; Yahnin et al.,

2003; Molchanov et al., 2004; Семенова и др., 2008; Semenova, Yahnin, 2008; Ермакова, 2009]). Подробный морфологический анализ ИАР на средних широтах проведен в работе [Полюшкина и др., 2014]. Обнаружено, что на режим излучения ИАР влияют различные импульсные процессы: суббури, всплески иррегулярных пульсаций, а также сейсмические процессы [Guglielmi et al., 2006; Parent, 2010; Потапов и др., 2008; Dovbnya et al., 2010; Довбня и др., 2012]. В то же время практически отсутствуют работы по воздействию собственно резонаторов на широкий класс геомагнитных пульсаций — гидромагнитных волн, непрерывно падающих на поверхность Земли из космического пространства.

В настоящей статье приведены наблюдательные факты, свидетельствующие о влиянии ионосферного и надионосферного резонаторов на динамические спектры пульсаций разных типов, и обсуждены полученные результаты.

Исходный материал и методы анализа. Мы изучали геомагнитные пульсации по данным Геофизической обсерватории Борок (58,0° N, 38,2° E) и Саянской солнечной обсерватории Монды (51,6° N, 100,9° E). Для анализа отдельных событий были использованы также имеющиеся в архиве обсерватории Борок записи станции «Колледж» (64,9° N, 147,9° W). Исходный материал для анализа — записи на

магнитную ленту УНЧ-вариаций электромагнитного поля Земли в диапазоне частот от 0 до 10 Гц. Обработка геомагнитных данных велась с применением методов компьютерного анализа. Текущий фрагмент магнитофонной записи выводился на диаграмму (сонограмму) в координатах частота—время. Получали мгновенный сонографический «снимок» переменного электромагнитного поля, на котором в координатах частота—время отражалась информация о сигналах в анализируемом интервале.

Наблюдения. Геомагнитные пульсации — это естественные вариации электромагнитного поля Земли, наблюдаемые на земной поверхности в диапазоне от миллигерц до нескольких герц. По морфологическим признакам они подразделяются на регулярные и иррегулярные колебания [Троицкая, Гульельми, 1969]. В зависимости от типа пульсации возбуждаются либо в магнитосфере, либо в ионосфере и имеют чаще всего широкий непрерывный спектр. Наличие резонаторов на трассе их распространения должно приводить к модификации динамического спектра пульсаций. Ниже изложены результаты такой модификации на конкретных примерах.

1. Колебания типа Pi1B относятся к классу иррегулярных и наблюдаются в виде импульсных всплесков длительностью от 2 до 5 мин. Они возбуждаются и распространяются в ионосфере при высыпании заряженных частиц радиационного пояса Земли. При наблюдении на земной поверхности динамический спектр Pi1B имеет широкополосный шумовой характер (рис. 1, а). Однако можно наблюдать и отчетливо выраженную дискретную структуру, которая проявляется в чередовании темных и светлых участков в спектре колебаний Pi1B (рис. 1, б). Подобное чередование отмечается и в гармоничной структуре шумового излучения, типичной для ИАР.

2. Пульсации типа Irdp также относятся к классу иррегулярных. Область их генерации расположена в магнитосфере. Динамический спектр имеет вид шумовой полосы с возрастающей средней частотой (рис. 2, а). На рис. 2, б видны также пульсации с нарастающей частотой, но здесь уже явно имеет место модуляция интенсивности спектра колебаний с уярчениями на выделенных частотах (на сонограмме — светлые вертикальные черточки). Интервал между ними равен примерно

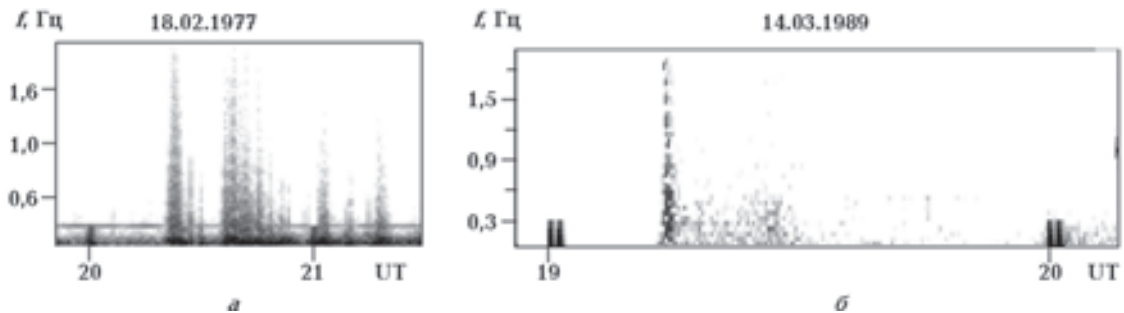


Рис. 1. Пример появления дискретной структуры в спектре широкополосного всплеска иррегулярных колебаний Pi1B. Обсерватория Борок.

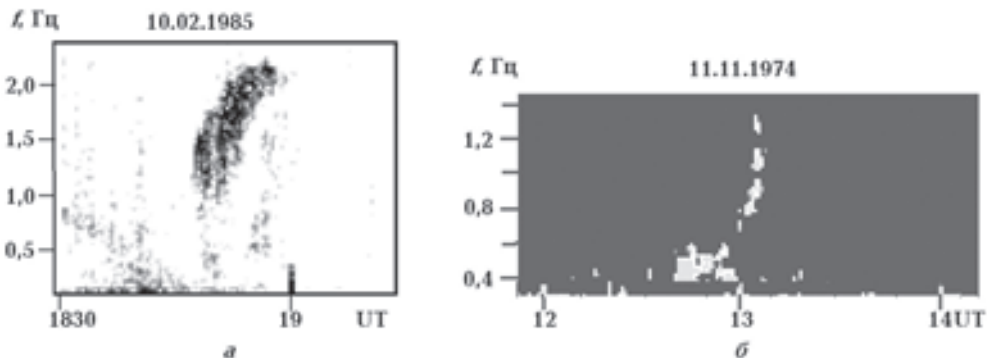


Рис. 2. Появление дискретной структуры в спектре Irdp. Обсерватория Борок.

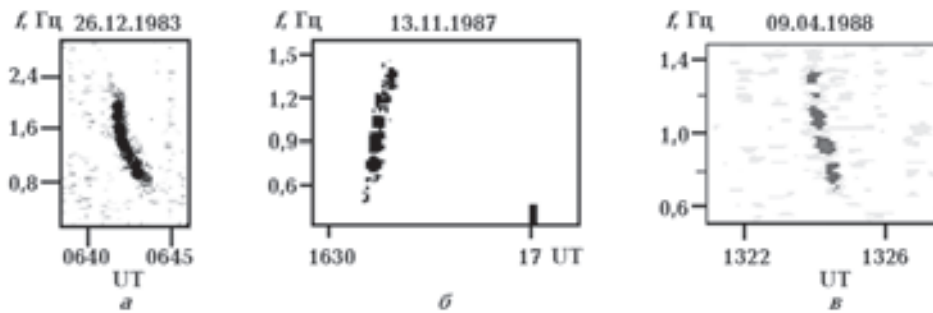


Рис. 3. Примеры появления дискретной структуры в сигналах падающего и растущего тонов. Обсерватория Борок.

0,3 Гц, что также соответствует спектру ИАР на широте обсерватории Борок [Довбня и др., 2013а,б].

3. На рис. 3 показаны динамические спектры пульсаций, наблюдающихся в виде отдельных сигналов падающих или растущих тонов. На рис. 3, а сигнал падающей частоты имеет непрерывную структуру, на рис. 3, б, в сигналы соответственно нарастающей и падающей частот имеют дискретную по частоте структуру, разбиваясь на отдельные элементы с интервалом между ними $\Delta f \sim 0,2$ Гц. Можно предположить, что здесь наблюдается влияние надионосферного резонатора, собственные частоты которого на широте обсерватории Борок близки к 0,2 Гц [Довбня и др., 2013а,б]. Его воздействие на сигналы приводит к появлению некоторых «запретных» частотных полос, распространение волн на которых невозможно.

4. На рис. 4 показано проявление резонаторов в колебаниях Pc1 («жемчужины»). Пульсации этого типа относятся к классу регулярных. Они возбуждаются в магнитосфере и на пути к Земле проходят через две резонансные полости (если они в это время существуют, что не всегда обязательно). На рис. 4, а (слева) наблюдаем одновременно периодические полосовые структуры двух резонаторов: ИАР и НИАР. Структура последнего видна в диапазоне частот ниже основного резонанса ИАР. Здесь же наблюдаются и три серии жемчужин, две из которых расположены на резонансной полосе ИАР, одна, отмеченная вертикальными черточками, — в диапазоне НИАР. Для нашего рассмотрения интерес представляет именно эта серия, на рис. 4, а (справа) она показана в другом частотно-временном разрешении. Данный пример может служить наглядной иллюстрацией воздействия резонаторов на геомагнит-

ные пульсации. В спектре Pc1 выделяются отдельные полосы, которые с незначительными отклонениями совпадают с мелкомасштабной структурой НИАР. Многополосная структура Pc1 отмечалась и ранее, но природа ее остается невыясненной. Одно из объяснений этому явлению заключается в том, что существует несколько источников, каждый из которых ответствен за генерацию излучения в одной полосе частот [Baransky et al., 1981]. В работе [Feugin et al., 1994] авторы полагают, что источник — один, а отдельные полосы обусловлены резонансными свойствами коэффициента отражения ионосферы вследствие существования ИАР. Наблюдение отдельных полос в диапазоне ниже основного резонанса ИАР (рис. 4, а) позволяет предположить влияние НИАР.

На рис. 4, б показан еще один пример пульсаций в частотно-временном представлении. Серия жемчужин на верхней панели представляет собой последовательность дискретных элементов растущей частоты с плавно нарастающей амплитудой в начале серии и так же плавно затухающей в конце. Пульсации наблюдались в утренние часы, когда вероятность появления ИАР невелика. На средней панели видна серия, которая наблюдалась в часы более вероятного появления ИАР. На нижней панели приведен фрагмент резонансной структуры шумового излучения, отражающего свойства ИАР, а также серия Pc1, показанная на средней панели, но в другом частотно-временном разрешении. Вся серия оказывается вытянутой вдоль резонансной полосы ИАР. (О подобном поведении серий пульсаций Pc1 сообщалось нами ранее в работах [Dovbnya et al., 2012a,b].) На средней панели (рис. 4, б) заметно тонкое частотное расщепление серии Pc1. Периоды повторения элементов серии в нижней и верхней полосках одинаковы. Подобный эффект, воз-

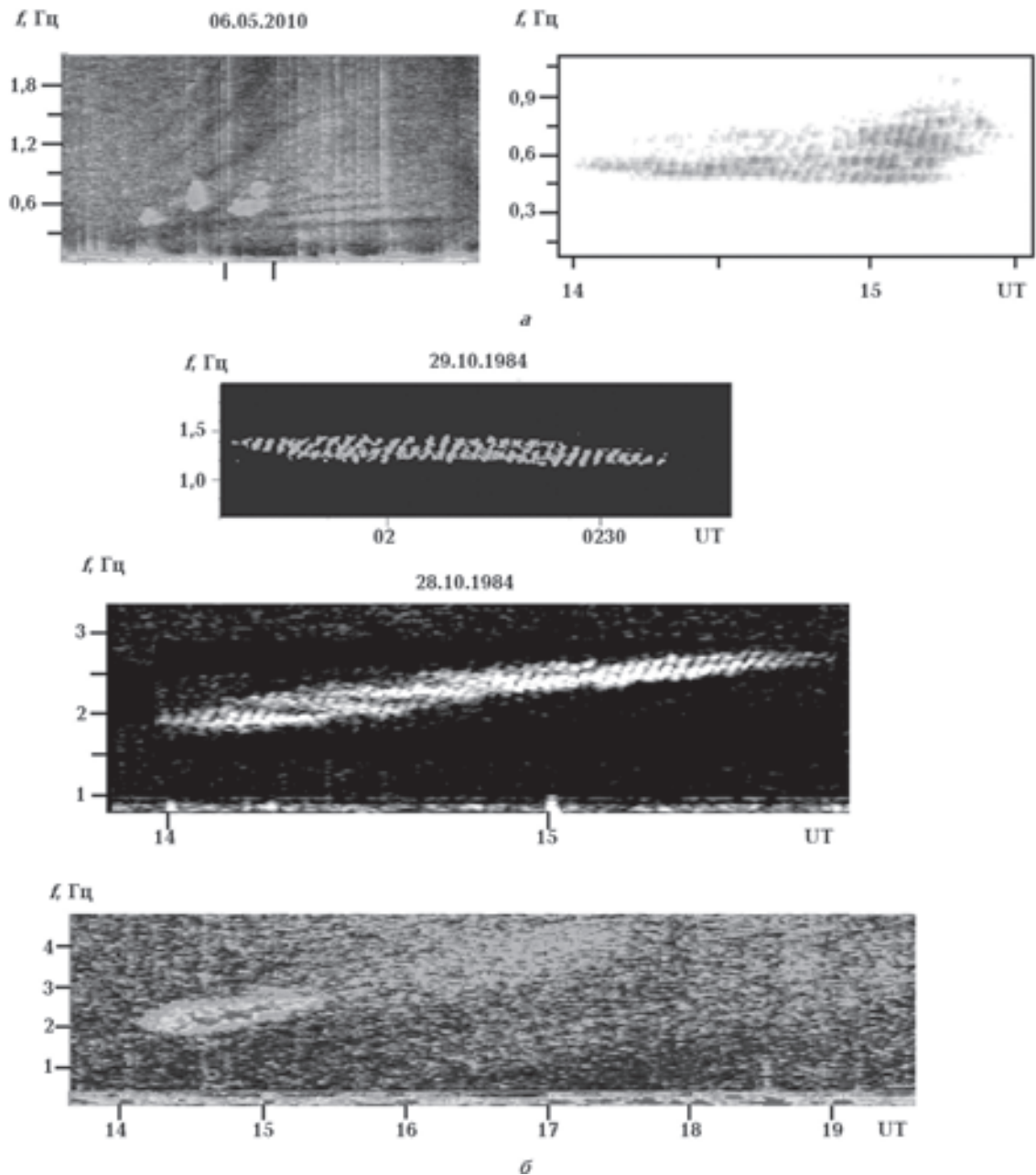


Рис. 4. Пример серий жемчужин: *а* — обсерватория Монды; *б* — обсерватория Борок: верхняя панель — геомагнитные пульсации типа Pc1 (жемчужины), наблюдавшиеся в утренние часы местного времени (LT=UT+3); средняя и нижняя панели — пульсации, наблюдавшиеся в вечернее время; заметна дискретизация по частоте, на нижней панели видны наклонные полосы, характерные для ионосферных альвеновских резонансов.

можно, связан с проявлением мелкомасштабной структуры НИАР на высших гармониках (рис. 5), которая и привела к частотному расщеплению широкополосной серии жемчужин. Таким образом, на рис. 4, *б* показан результат последовательного воздействия двух резонаторов на спектр пульсаций. Прохождение через

НИАР приводит к тонкому расщеплению спектра, соответствующего резонансной структуре резонатора, последующее влияние НИАР проявляется уже в захвате трансформированной серии Pc1 на резонансную полосу ИАР.

5. На рис. 6 даны примеры электромагнитных импульсов, наблюдаемых на земной по-

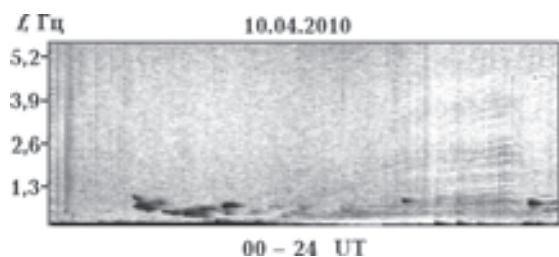


Рис. 5. Периодическая полосовая структура электромагнитного шумового излучения как проявление одновременно ионосферного (широкие полосы) и надionoсферного (узкие полосы) резонаторов. Обсерватория Монды.

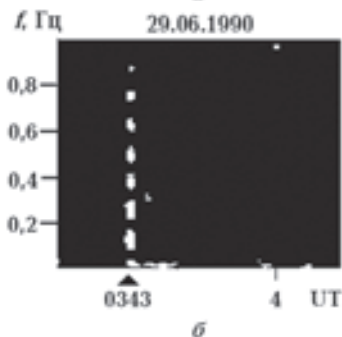
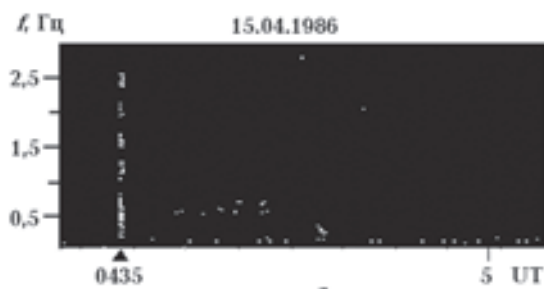


Рис. 6. Электромагнитные импульсы, наблюдаемые при внезапных началах магнитных бурь. Обсерватория Борок. Стрелками отмечены моменты SSC.

верхности в моменты внезапного начала магнитных бурь (SSC). В обоих случаях динамический спектр импульса имеет явно выраженный дискретный характер. Интересно отметить, что на рис. 6, а, б масштаб амплитудно-частотной модуляции разный. Мы связываем такое различие с влиянием двух разных резонаторов — ИАР (рис. 6, а) и НИАР (рис. 6, б).

б. На рис. 7 приведены примеры электромагнитных сигналов, связанных с землетрясениями [Довбня и др., 2006]. На обсерватории Борок (рис. 7, а) зарегистрированы сразу три импульсных сигнала, связанных с подготовкой трех сейсмических толчков (показаны стрелками), имевших место в разных регионах земной поверхности 14 марта 1986 г.; на обсерватории Монды (рис. 7, б) — импульс, связанный, по-

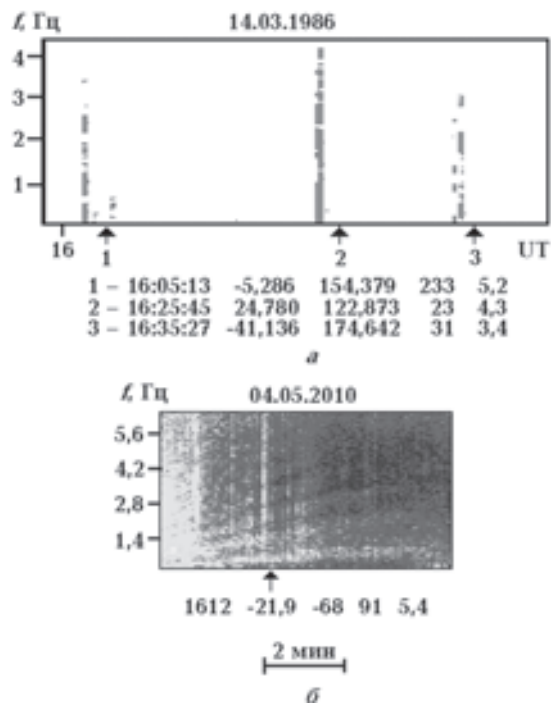


Рис. 7. Импульсы, связанные с подготовкой землетрясений: а — обсерватория Борок; б — обсерватория Монды. Цифры под рисунками означают следующее: время сейсмического толчка (UT), координаты эпицентра (географические широта и долгота), глубина очага, магнитуда.

видимому, с процессом подготовки землетрясения магнитудой 5,4 балла в Южной Америке 4 мая 2010 г. В обоих случаях электромагнитные импульсы, предшествовавшие землетрясениям, характеризуются дискретной структурой, обусловленной, на наш взгляд, влиянием ИАР. Особенно наглядно эффект проявляется на рис. 7 б, где ясно видно совпадение полос усиления в спектре импульсного сигнала с частотами резонансных полос ИАР.

Обсуждение и заключение. Рассмотрены примеры воздействия резонансных образований в магнитосферно-ионосферной плазме на геомагнитные пульсации, проникающие из космического пространства к земной поверхности. Результат воздействия отмечается в появлении дискретной структуры в спектре широкополосного электромагнитного излучения. Параметры амплитудно-частотной модуляции этой структуры находятся в неплохом соответствии с резонансной полосовой структурой ионосферного и надionoсферного резонаторов. Особенно отчетливо это заметно в тех случаях, когда одновременно с пульсациями наблюдается характерная полосовая структура шумового излучения. Полученные результаты

в какой-то мере были ожидаемыми, если принять во внимание, что электромагнитное излучение фильтруется при прохождении через резонансную полость.

Интересно отметить следующее. Появление дискретной структуры в спектре пульсаций в общем случае указывает на прохождение сигналов через область формирования того или иного резонатора, т. е. несет в себе информацию о трассе распространения сигнала. В частности, появление структуры, адекватной резонансным полосам ИАР, свидетельствует о распространении колебаний вдоль ионосферы. Это не противоречит принятым представлениям в случае колебаний Pc1 (жемчужин), сверхдальнее распространение которых объясняется существованием МГД-волновода в слое F2 ионосферы.

Появление дискретной структуры может иметь информационное значение при рассмотрении проблемы возможных каналов распространения сейсмoeлектромагнитных импульсов. Отсутствие достаточно убедительной версии ставит под сомнение сам факт наличия таких сигналов. Вместе с тем в работе [Довбня и др., 2006] сообщалось о наблюдении электромагнитных импульсов во временной окрестности землетрясений. Сигналы от удаленных землетрясений наблюдались на значительных расстояниях от эпицентра сейсмического события. Там же впервые было обращено внимание на дискретный характер таких сигналов, но не обсуждалась возможная природа этой особенности. В рамках данной работы можно предположить, что сейсмoeлектромагнитные импульсы могут достигать высот ионосферы и распространяться в МГД-волноводе с альвеновской скоростью на значительные расстояния. Дискретная структура импульсов, по крайней мере, не противоречит этому предположению.

Традиционно классической картиной проявления ИАР считается гармоничная полосовая структура электромагнитного шумового излучения, регистрируемого на земной поверхности. Если же говорить о самом излучении, то в настоящее время данный вопрос все еще находится на стадии обсуждения. Ранее полагалось, что основной источник возбуждения ИАР — электромагнитная энергия, обу-

словленная глобальной грозовой активностью в атмосфере Земли [Беляев и др., 1989; Shalimov and Böisinger, 2008]. Позже было установлено, что этот механизм не эффективен для средних и высоких широт [Surkov et al., 2006]. В работах [Fedorov et al., 2006; Surkov et al., 2006] предлагалось принимать, что источником колебаний ИАР являются ближние грозы. Однако трудно представить себе непрерывную грозовую активность в зимнее время. В других работах в качестве возможного механизма рассматривались альвеновские волны, падающие сверху на ионосферу [Chaston et al., 2002; Lysak, Yoshikawa, 2006; Streltsov, Karlsson, 2008], а также плазменные неустойчивости [Lysak, 1991; Pokhotelov et al., 2001]. Таким образом, ответ на вопрос об источнике электромагнитного шума и его местоположении отнюдь не очевиден.

На рис. 5 приведена периодическая полосовая структура электромагнитного шума, которую в данном случае можно рассматривать как проявление одновременно двух резонаторов — ионосферного (широкие полосы) и надиионосферного (узкие полосы). Обратим внимание на поведение высших гармоник НИАР (узкие полосы). Хорошо заметны их ослабление в промежутке между гармониками ИАР и усиление внутри резонансных полос. Однако такое возможно только при условии распространения шума «сверху», когда он последовательно распространяется через верхний резонатор, где формируется первоначальная узкополосная структура, и затем происходит фильтрация гармоник при распространении шума внутри ионосферного резонатора. На наш взгляд, это позволяет принять гипотезу внутримангнитосферного происхождения электромагнитного шумового излучения, полосовая структура которого представляет собой наземное проявление резонансных образований во взаимосвязанной системе ионосфера—магнитосфера.

Благодарности. Авторы сердечно благодарят Б. И. Клайна за полезные обсуждения при подготовке данной статьи.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-05-00066 и 13-05-00529) и Программы № 4 фундаментальных исследований Президиума РАН (проект 6.2).

Список литературы

Беляев П. П., Поляков С. В., Ермакова Е. Н., Исаев С. В. Экспериментальные исследования ионо-

сферного альвеновского резонатора по наблюдениям электромагнитного шумового фона

- в солнечном цикле 1985—1995 гг. *Радиофизика*. 1997. Т. 40. № 10. С. 1305—1319.
- 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. № 3. С. 840—843.
- 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.
- Довбня Б. В., Гульельми А. В., Потапов А. С., Клайн Б. И. О существовании надионосферного резонатора Альвена. *Солнечно-земная физика*. 2013а. Вып. 22. С. 12—15.
- Довбня Б. В., Гульельми А. В., Потапов А. С., Рахматуллин Р. А. Дополнительный резонатор для ультранизкочастотных волн. *Геофиз. исследования*. 2013б. Т. 14. С. 49—58.
- Довбня Б. В., Зотов О. Д., Мострюков А. О., Щенетнов Р. В. Электромагнитные сигналы во временной окрестности землетрясений. *Физика Земли*. 2006. № 8. С. 60—65.
- Довбня Б. В., Потапов А. С., Рахматуллин Р. А. Воздействие землетрясений на режим ультранизкочастотных электромагнитных эмиссий. *Геофиз. журн.* 2012. Т. 34. № 5. С. 189—193.
- Ермакова Е. Н. Ионосферные резонансные структуры и их влияние на формирование спектров ультранизкочастотных полей естественного и искусственного происхождения: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород: ФГНУ НИРФИ Роснауки, 2009. 34 с.
- Полюшкина Т. Н., Довбня Б. В., Потапов А. С., Цэгмэг Б., Рахматуллин Р. А. Частотная структура спектральных полос ИАР и параметры ионосферы. *Геофиз. исследования*. 2014 (в печати).
- Поляков С. В., Рапопорт В. О. Ионосферный альвеновский резонатор. *Геомагнетизм и аэронаука*. 1981. Т. 21. С. 610—614.
- Потапов А. С., Довбня Б. В., Цэгмэг Б. О воздействии землетрясений на ионосферные резонансы Альвена. *Физика Земли*. 2008. № 4. С. 93—96.
- Остапенко А. А., Поляков С. В. Динамика коэффициента отражения альвеновских волн диапазона Pc1 от ионосферы при вариациях электронной концентрации нижней ионосферы. *Геомагнетизм и аэронаука*. 1990. Т. 30. № 1. С. 50—56.
- Семенова Н. В., Яхнин А. Г., Васильев А. Н., Амму О. Особенности резонансных структур в спектрах УНЧ электромагнитного шума в высоких широтах (обс. Баренцбург). *Геомагнетизм и аэронаука*. 2008. Т. 48. № 1. С. 40—48.
- Троицкая В. А., Гульельми А. В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. *Успехи физ. наук*. 1969. Т. 97. Вып. 3. С. 453—494.
- Baransky L., Golikov Yu., Feygin F., Harchenko I., Kangas J., Pikkarainen T., 1981. Role of the plasmopause and ionosphere in the generation and propagation of pearl pulsations. *J. Atmos. Terr. Phys.* 43, 875—881.
- Belyaev P. P., Böisinger T., Isaev S. V., Kangas J., 1999. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 104, 4305—4317. doi:10.1029/1998JA900062.
- Böisinger T., Haldoupis C., Belyaev P. P., Yakunin M. N., Semenova N. N., Demekhov A. G., Angelopoulos V., 2002. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station (L=1.3). *J. Geophys. Res.* 107(A10), 1281. doi:10.1029/2001JA005076.
- Chaston C. C., Bonnell J. W., Carlson C. W., Berthomier M., Peticols L. M., Roth I., McFadden J. P., Ergun R. E., Strangeway R. J., 2002. Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 107(A11), 1413. doi:10.1029/2002JA009272.
- Dovbnya B. V., Zotov O. D., Klain B. I., Kurazhkovskaya N. A., Potapov A. S., Rakhmatulin R. A., 2012a. Spectral properties of the Pc1 waves and noise-like pulsations with resonance structure. *9th International conference «Problems of Geocosmos», October 8—12, 2012, St. Petersburg*. Book of Abstracts. P. 164.
- Dovbnya B. V., Zotov O. D., Klain B. I., 2012b. *9th International conference «Problems of Geocosmos», October 8—12, 2012, St. Petersburg*. Book of Abstracts. P. 163.
- Dovbnya B. V., Potapov A. S., Rakhmatulin R. A., 2010. Earthquake effects in the pulsations of geomagnetic field. *Proceedings of the 8th Int. Conf. «Problems of Geocosmos» (St. Petersburg, Russia, 20—24 Sept. 2010)*, 403—407.
- Demekhov A. G., Trakhtenherts V. Yu., Böisinger T., 2000. Pc1 waves and ionospheric Alfvén resonator: Generation or filtration. *Geophys. Res. Lett.* 27, 3805—3808.
- Fedorov E., Schekotov A. Ju., Molchanov O. A., Hayakawa M., Surkov V. V., Gladichev V. A., 2006. An energy source for the mid-latitude IAR: World thunderstorm centers, nearby discharges or neutral wind fluctuations? *Phys. Chem. Earth*. 31, is. 4-9, 462—468.
- Feygin F. Z., Nekrasov A. K., Mursula K., Kangas J., Pikkarainen T., 1994. Coherent multiple Pc1 pulsation bands: possible evidence for ionospheric Alfvén resonator. *Ann. Geophys.* 12, 147—151.

- Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B., Hayakawa M., Dovbnya B., 2006. On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfvén resonances. *Phys. Chem. Earth*. 31, 469—472.
- Lysak R. L., 1991. Feedback instability of the ionospheric resonator cavity. *J. Geophys. Res.* 96, A2, 1553—1568.
- Lysak R. L., Yoshikawa A., 2006. Resonant cavities and waveguides in the ionosphere and atmosphere. In: *Magnetospheric ULF Waves: Synthesis and New Directions*, Geophys. Monogr. Ser., V. 169. P. 289—306. AGU, Washington, D. C.
- Molchanov O. A., Schekotov A. Yu., Fedorov E., Hayakawa M., 2004. Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka. *Phys. Chem. Earth* 29, 649—655.
- Parent A., Mann I. R., Rae I. J., 2010. Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 115, A02312. doi:10.1029/2009JA014673.
- Pokhotelov O. A., Khrushev V., Parrot M., Senchenkov S., Pavlenko V., 2001. Ionospheric Alfvén resonator revisited: Feedback instability. *J. Geophys. Res.* 106, 813.
- Semenova N. V., Yahnin A. G., 2008. Diurnal behaviour of the ionospheric Alfvén resonator signatures as observed at high latitude observatory Barentsburg (L=15). *Ann. Geophys.* 26, 2245—2251.
- Shalimov S., Bösinger T., 2008. On distant excitation of the ionospheric Alfvén resonator by positive Cloud-to-ground lightning discharges. *J. Geophys. Res.* 113, A02303. doi:10.1029/2007JA012614.
- Streltsov A. V., Karlsson T., 2008. Small scale, localized electromagnetic waves observed by Cluster: Result of magnetosphere-ionosphere interactions. *Geophys. Res. Lett.* 35, L22107.
- Surkov V. V., Hayakawa M., Schekotov A. Y., Fedorov E. N., Molchanov O. A., 2006. Ionospheric Alfvén resonator excitation due to nearby thunderstorms. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 111, A01303. doi:10.1029/2005JA011320.
- Yahnin A. G., Semenova N. V., Ostapenko A. A., Kangas J., Manninen J., Turunen T., 2003. 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.* 21, 779—786.

On the impact of MHD resonators on the geomagnetic pulsations

© B. V. Dovbnya, A. S. Potapov, A. V. Guglielmi, R. A. Rakhmatulin, 2014

The examples of the time-frequency structure of geomagnetic pulsations are given. It is shown that in some cases the pulsations of different types may have one thing in common — a discrete structure of the dynamic spectrum. The discreteness is manifested in the alternation of «permitted» and «forbidden» frequencies. Such a structure is analogous to a periodic ripple structure of spectral bands formed by MHD cavities in the magnetosphere-ionosphere plasma. Appearance of discrete spectrum of pulsations is attributed to resonator filtering properties acting on hydromagnetic waves as they pass through the resonant cavity. It is assumed that in some cases the discreteness can provide useful information about the propagation channels of signals of lithospheric or magnetospheric origin.

Key words: resonators, geomagnetic pulsations, discrete structure of spectrum.

References

- Belyaev P. P., Polyakov S. V., Ermakova E. N., Isaev S. V., 1997. Experimental studies of the ionospheric Alfvén resonator according to the observations of the electromagnetic background noise in the solar cycle 1985—1995. *Radiofizika* 40(10), 1305—1319 (in Russian).
- Belyaev P. P., Polyakov S. V., Rapoport V. O., Trahtengerts V. Y., 1987. Detection of the resonance structure of the spectrum of atmospheric electromagnetic noise background in the range of short-period geomagnetic pulsations. *Doklady AN SSSR* 297(3), 840—843 (in Russian).
- Belyaev P. P., Polyakov S. V., Rapoport V. O., Trahtengerts V. Y., 1989. The theory of the formation of the resonance structure of atmospheric electromagnetic noise background in the range of short-period geomagnetic pulsations. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* 32(7), 802—810 (in Russian).
- Dovbnya B. V., Guglielmi A. V., Potapov A. S., Kline B. I., 2013a. Existence nadionosfernogo Alfvén resonator. *Solnechno-zemnaya fizika* is. 22, 12—15 (in Russian).
- Dovbnya B. V., Guglielmi A. V., Potapov A. S., Rakhmatulin R. A., 2013b. Additional resonator for ultra-low

- waves. *Geofizicheskie issledovaniya* 14, 49—58 (in Russian).
- Dovbnaya B. V., Zotov O. D., Mostryukov A. O., Schepetnov R. V., 2006. Electromagnetic signals in the time vicinity of earthquakes. *Fizika Zemli* (8), 60—65 (in Russian).
- Dovbnaya B. V., Potapov A. S., Rakhmatulin R. A., 2012. Impact of the earthquake on the regime of ultra-low electromagnetic emissions. *Geofizicheskiy zhurnal* 34(5), 189—193 (in Russian).
- Ermakova E. N., 2009. Ionospheric resonance structures and their influence on the formation of the spectra of ultra fields of natural and artificial origin: Dr. phys. and math. sci. Abstract. Nizhny Novgorod: FSSI RIRR, 34 p. (in Russian).
- Polyushkina T. N., Dovbnaya B. V., Potapov A. S., Tsegmed B., Rakhmatulin R. A., 2014. Frequency structure of the spectral bands of the IAR and the parameters of the ionosphere. *Geofizicheskie issledovaniya* (in Russian) (in print).
- Polyakov S. V., Rapoport V. O., 1981. Ionospheric Alfvén resonator. *Geomagnetizm i aeronomiya* 21, 610—614 (in Russian).
- Potapov A. S., Dovbnaya B. V., Tsegmed B., 2008. On the effect of earthquakes on the ionospheric Alfvén resonances. *Fizika Zemli* (4), 93—96 (in Russian).
- Ostapenko A. A., Polyakov S. V., 1990. Dynamics reflection coefficient Alfvén waves Pc1 range of ionospheric electron density variations at the bottom of the ionosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* 30(1), 50—56 (in Russian).
- Semenova N. V., Yakhnin A. G., Vasiliev A. N., Amm O., 2008. Features resonance structures in the spectra of the VLF electromagnetic noise at high latitudes (obs. Barentsburg). *Geomagnetizm i aeronomiya* 48(1), 40—48 (in Russian).
- Troitskaya V. A., Guglielmi A. V., 1969. Geomagnetic pulsations and diagnostics of the magnetosphere. *Uspehi fizicheskikh nauk* 97(is. 3), 453—494 (in Russian).
- Baransky L., Golikov Yu., Feygin F., Harchenko I., Kangas J., Pikkarainen T., 1981. Role of the plasmopause and ionosphere in the generation and propagation of pearl pulsations. *J. Atmos. Terr. Phys.* 43, 875—881.
- Belyaev P. P., Böisinger T., Isaev S. V., Kangas J., 1999. First evidence at high latitudes for the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 104, 4305—4317. doi:10.1029/1998JA900062.
- Böisinger T., Haldoupis C., Belyaev P. P., Yakunin M. N., Semenova N. N., Demekhov A. G., Angelopoulos V., 2002. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a low-latitude station (L=1.3). *J. Geophys. Res.* 107(A10), 1281. doi:10.1029/2001JA005076.
- Chaston C. C., Bonnell J. W., Carlson C. W., Berthomier M., Peticols L. M., Roth I., McFadden J. P., Ergun R. E., Strangeway R. J., 2002. Electron acceleration in the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 107(A11), 1413. doi:10.1029/2002JA009272.
- Dovbnaya B. V., Zotov O. D., Klain B. I., Kurazhkovskaya N. A., Potapov A. S., Rakhmatulin R. A., 2012a. Spectral properties of the Pc1 waves and noise-like pulsations with resonance structure. *9th International conference «Problems of Geocosmos», October 8—12, 2012, St. Petersburg.* Book of Abstracts. P. 164.
- Dovbnaya B. V., Zotov O. D., Klain B. I., 2012b. *9th International conference «Problems of Geocosmos», October 8—12, 2012, St. Petersburg.* Book of Abstracts. P. 163.
- Dovbnaya B. V., Potapov A. S., Rakhmatulin R. A., 2010. Earthquake effects in the pulsations of geomagnetic field. *Proceedings of the 8th Int. Conf. «Problems of Geocosmos» (St. Petersburg, Russia, 20—24 Sept. 2010)*, 403—407.
- Demekhov A. G., Trakhtenherts V. Yu., Böisinger T., 2000. Pc1 waves and ionospheric Alfvén resonator: Generation or filtration. *Geophys. Res. Lett.* 27, 3805—3808.
- Fedorov E., Schekotov A. Ju., Molchanov O. A., Hayakawa M., Surkov V. V., Gladichev V. A., 2006. An energy source for the mid-latitude IAR: World thunderstorm centers, nearby discharges or neutral wind fluctuations? *Phys. Chem. Earth.* 31, is. 4-9, 462—468.
- Feygin F. Z., Nekrasov A. K., Mursula K., Kangas J., Pikkarainen T., 1994. Coherent multiple Pc1 pulsation bands: possible evidence for ionospheric Alfvén resonator. *Ann. Geophys.* 12, 147—151.
- Guglielmi A., Potapov A., Tsegmed B., Hayakawa M., Dovbnaya B., 2006. On the earthquake effects in the regime of ionospheric Alfvén resonances. *Phys. Chem. Earth.* 31, 469—472.
- Lysak R. L., 1991. Feedback instability of the ionospheric resonator cavity. *J. Geophys. Res.* 96, A2, 1553—1568.
- Lysak R. L., Yoshikawa A., 2006. Resonant cavities and waveguides in the ionosphere and atmosphere. In: *Magnetospheric ULF Waves: Synthesis and New Directions*, Geophys. Monogr. Ser., V. 169. P. 289—306. AGU, Washington, D. C.
- Molchanov O. A., Schekotov A. Yu., Fedorov E., Hayakawa M., 2004. Ionospheric Alfvén resonance at

- middle latitudes: results of observations at Kamchatka. *Phys. Chem. Earth* 29, 649—655.
- Parent A., Mann I. R., Rae I. J., 2010. Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator. *J. Geophys. Res.* 115, A02312. doi:10.1029/2009JA014673.
- Pokhotelov O. A., Khrushev V., Parrot M., Senchenkov S., Pavlenko V., 2001. Ionospheric Alfvén resonator revisited: Feedback instability. *J. Geophys. Res.* 106, 813.
- Semenova N. V., Yahnin A. G., 2008. Diurnal behaviour of the ionospheric Alfvén resonator signatures as observed at high latitude observatory Barentsburg (L=15). *Ann. Geophys.* 26, 2245—2251.
- Shalimov S., Börsinger T., 2008. On distant excitation of the ionospheric Alfvén resonator by positive Cloud-to-ground lightning discharges. *J. Geophys. Res.* 113, A02303. doi:10.1029/2007JA012614.
- Streltsov A. V., Karlsson T., 2008. Small scale, localized electromagnetic waves observed by Cluster: Result of magnetosphere-ionosphere interactions. *Geophys. Res. Lett.* 35, L22107.
- Surkov V. V., Hayakawa M., Schekotov A. Y., Fedorov E. N., Molchanov O. A., 2006. Ionospheric Alfvén resonator excitation due to nearby thunderstorms. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 111, A01303. doi:10.1029/2005JA011320.
- Yahnin A. G., Semenova N. V., Ostapenko A. A., Kangas J., Manninen J., Turunen T., 2003. 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.* 21, 779—786.