

УДК 550.385.1

ВЕТВИ РЕЗОНАНСНОГО УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2023 г. В. И. Бадин*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия*

**e-mail: badin@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 09.03.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Анализируются доплеровские наблюдения авроральной электроструи норвежским радаром STARE в течение одного солнечного оборота, предшествовавшего сильной магнитной буре. При этом наименьшая частота резонансного ультранизкочастотного поглощения определяется как частота ступенчатого падения спектральной плотности мощности наблюдаемого сигнала. В свою очередь, частота ступенчатого падения спектральной плотности мощности определяется посредством решения минимальной вариационной задачи, которая наилучшим образом (метод наименьших квадратов) вписывает ступенчатую модель средней спектральной мощности в профиль спектральной плотности мощности реальных наблюдений. Последовательное сжатие спектрального окна, в котором решается вариационная задача, позволяет построить диаграммы решений минимальной задачи на плоскости частота — мощность резонансного поглощения. С помощью таких диаграмм выделены высокочастотная и низкочастотная ветви резонансного ультранизкочастотного поглощения. Обнаружено, что в слабозмущенных условиях изменчивость резонансного ультранизкочастотного поглощения обусловлена, в первую очередь, вариациями мощности поглощения в обеих ветвях.

DOI: 10.31857/S0016794022100273, EDN: PJNTLY

1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения ультранизкочастотных (УНЧ) резонансов магнитных силовых линий представляют большой интерес для диагностики магнитосферы Земли и процессов в околоземном космическом пространстве. Резонансы магнитных силовых линий представляют собой стоячие альвеновские волны, которые могут возбуждаться различными источниками, например, в результате воздействия на магнитосферу переменного динамического давления солнечного ветра в околополуденном секторе местного времени. Дж.В. Данжи [1964] осуществил пионерские теоретические исследования по магнитосферным резонансам и впервые вычислил фундаментальные периоды тороидальных крутильных колебаний в дипольном геомагнитном поле.

Для описания и моделирования резонансных колебаний магнитных силовых линий часто используют приближение бесконечно большой ионосферной проводимости, в котором стоячая альвеновская волна имеет в ионосфере узлы электрического поля и, соответственно, пучности электрического тока [Cummings et al., 1969; Southwood, 1974; Chen and Hasegawa, 1974]. В этом слу-

чае условие резонанса состоит в том, что на длине магнитной силовой линии между сопряженными ионосферами должно укладываться целое число полуволн. Численные расчеты резонансных частот в магнитной гидродинамике (МГД) с бесконечно большой ионосферной проводимостью показали, что типичные значения минимальной резонансной частоты на дневной стороне спокойной магнитосферы составляют 3–5 мГц [Lee and Lysak, 1989; Cheng and Zaharia, 2003]. Аналогичные значения минимальной резонансной частоты дают наземные и спутниковые магнитные наблюдения в спокойных условиях [Anderson et al., 1989; Lanzerotti et al., 1999; Urban et al., 2011].

Учет конечной величины ионосферной проводимости допускает кроме полуволновых собственных колебаний магнитных силовых линий возбуждение четвертьволновых колебаний, в которых на длине силовой линии между сопряженными ионосферами укладывается нечетное число четвертей длины волны [Allan and Knox, 1979a, b]. Возбуждение четвертьволновых колебаний возможно в тех случаях, когда волновая проводимость магнитосферы превосходит интегральную проводимость Педерсена в одной из сопряженных ионосфер [Alperovich and Fedorov, 2007].

Такие условия могут реализоваться, например, внутри плазмосферы, где альвеновская скорость может быть достаточно малой [Леонович и др., 2015]. При возбуждении четвертьволновых колебаний магнитных силовых линий пучность поперечного электрического поля должна наблюдаться в ионосфере с меньшей интегральной проводимостью.

Согласно теоретическим оценкам [Yumoto et al., 1995], добротность магнитосферного МГД-резонатора для полуволновых резонансных колебаний достаточно низкая и в высоких геомагнитных широтах имеет порядок единицы. Четвертьволновые колебания имеют пучность электрического поля в одной из сопряженных ионосфер. Поэтому, при прочих равных условиях, омическая диссипация энергии четвертьволновых колебаний выше, чем такая диссипация в полуволновых колебаниях. Следовательно, для четвертьволновых собственных колебаний можно ожидать еще более низкую добротность МГД-резонатора. Ввиду низкой добротности резонатора, прямые экспериментальные наблюдения возбуждения резонансных колебаний сталкиваются со значительными трудностями, см. например [Obana et al., 2015]. Как правило, наблюдать фундаментальные резонансные гармоники не удается, а удается наблюдать гармоники более высокого порядка, для которых добротность резонатора выше. Например, для полуволновых колебаний удается наблюдать вторые гармоники [Cummins et al., 1969], для четвертьволновых — четвертые [Budnik et al., 1998] или более высокие. При этом экспериментально определить порядок наблюдаемой гармоники достаточно сложно. Более того, в опубликованной литературе нет сообщений об успешных регулярных мониторинговых наблюдениях возбуждения магнитосферных резонансов. Таким образом, приходится признать, что прямые экспериментальные наблюдения возбуждения резонансов магнитных силовых линий не обеспечивают решения задач диагностики магнитосферы.

С учетом низкой добротности УНЧ-резонатора, альтернативный подход к диагностике магнитосферы может состоять в оценке резонансного поглощения энергии фоновых ультранизкочастотных колебаний, наблюдаемых при экспериментальном мониторинге электрических и магнитных полей в околоземном пространстве. В работах [Бадин 2017, 2019] показана возможность оценки резонансного УНЧ-поглощения по спектральной мощности доплеровских радарных наблюдений авроральной электроструи. Основная задача данной работы состоит в том, чтобы обобщить такие оценки для более широкого класса мониторинговых радарных наблюдений.

2. ОБРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Данная работа анализирует регулярные доплеровские наблюдения норвежского радара STARE [Greenwald et al., 1978], которые предшествовали сильной магнитной буре 29 октября 2003 г. В таких радарных наблюдениях измеряется скорость дрейфа ионосферных электронов по доплеровскому сдвигу частоты радиоволн, рассеянных назад ионосферными неоднородностями электронной концентрации, возникающими в авроральной электроструе при достаточной активности последней. Анализируемый период наблюдений включал один солнечный оборот, предшествовавший началу сильной магнитной бури.

В работах [Бадин 2017, 2019] показано, что средняя спектральная плотность мощности (СПМ) скорости дрейфа электронов, вычисляемая посредством численного Фурье-преобразования данных измерений, испытывает ступенчатое падение (скачок) на определенной частоте. Такое падение спектральной плотности мощности (СПМ) интерпретировалось как эффект резонансного поглощения энергии фоновых УНЧ-колебаний поперечного электрического поля, наблюдаемого посредством измерений скорости дрейфа электронов. Применение численного преобразования Фурье означает, что временной ряд наблюдений считался стационарным. Использовались четырехчасовые интервалы наблюдений, что позволяло анализировать достаточно низкие частоты колебаний, и в то же время ограничивать влияние нестационарности временных рядов. При этом количественная оценка частоты, на которой происходило падение средней спектральной мощности, проводилась посредством решения вариационной задачи на минимум функционала, представлявшего собой сумму квадратов отклонений вычисленной спектральной мощности измерений от ступенчатой модели средней спектральной мощности, вписываемой наилучшим образом (метод наименьших квадратов) в профиль СПМ реальных наблюдений. Найденная таким образом частота интерпретировалась как минимальная частота резонансного УНЧ-поглощения в континууме собственных частот силовых линий геомагнитного поля.

Предложенный метод выявления эффектов резонансного поглощения неявно предполагает, что исходную СПМ фоновых УНЧ-колебаний можно считать достаточно однородной. В реальных наблюдениях спектр фоновых колебаний может быть сильно неоднородным, например, за счет УНЧ-пульсаций, возбуждаемых как внешними (солнечный ветер) так и внутримангнитосферными (плазменные неустойчивости) источниками. Вследствие этого СПМ реальных наблюдений может содержать целый ряд скачков, как положи-

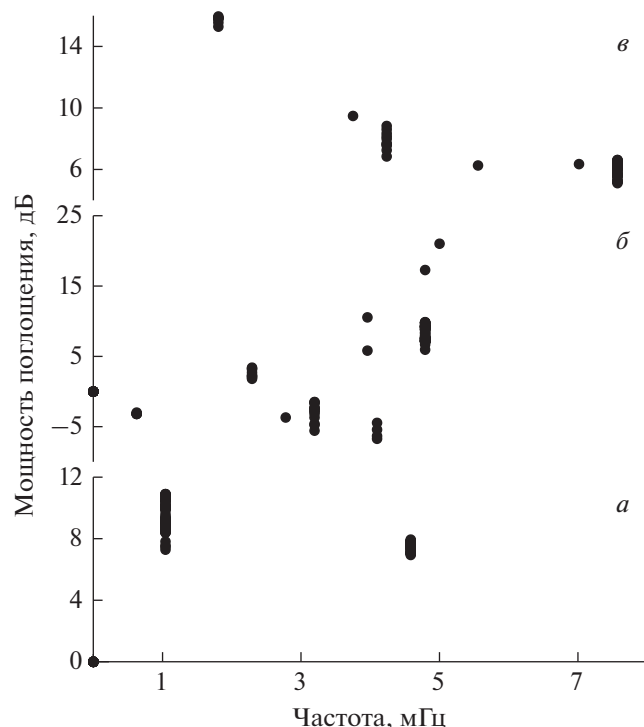


Рис. 1. Диаграммы решений минимальной задачи для: (а) — восьмого луча норвежского радара STARE в вечернем секторе местного времени 30.09.2003; (б) — шестого луча радара в утреннем секторе 21.10.2003; (в) — восьмого луча радара в утреннем секторе 28.10.2003 (лучи нумеруются в направлении от более высоких широт к более низким).

тельных, так и отрицательных по величине, и эти скачки искажают оценку резонансного поглощения предложенным методом. Кроме того, временной ряд наблюдений может оказаться существенно нестационарным, что внесет дополнительные искажения. Наконец, вариационная задача на минимум функционала (минимальная задача) относится к классу некорректно поставленных задач [Тихонов и Арсенин, 1986], что может привести к появлению ложных решений, не имеющих физического смысла. Ввиду этих обстоятельств, методика анализа экспериментальных данных необходимо доработать и сделать более устойчивой к возможным искажениям результатов.

Исследования некорректно поставленных задач [Тихонов и Арсенин, 1986] привели к заключению, что задачу можно считать математически корректной в том случае, когда малые изменения исходных данных задачи приводят к достаточно малым изменениям решений, и некорректной в противном случае, когда малые изменения исходных данных приводят к значительным изменениям решений. При обработке экспериментальных данных мы не имеем возможности каким-либо образом изменять сами данные, но можем изме-

нить тот интервал частот (спектральное окно), в котором решается минимальная задача. Начиная со спектрального окна, равного всему интервалу изучаемых частот (в данной работе это частоты от 0.5 до 10 мГц), мы можем последовательно сжимать спектральное окно на малый шаг по частоте и на каждом шаге решать задачу на минимум функционала. Каждое такое решение можно изобразить точкой на плоскости, абсцисса которой представляет собой частоту решения минимальной задачи, а ордината — мощность поглощения сигнала, т.е. высоту ступеньки падения СПМ. Собирав все такие точки в одной диаграмме, мы получим диаграмму решений минимальной задачи. В каждой такой диаграмме малые изменения спектрального окна играют роль малых изменений исходных данных задачи. По изменениям решений минимальной задачи мы можем судить о корректности или некорректности последней.

Передвигая верхнюю частотную границу спектрального окна к нижней границе частотного интервала, мы получим нисходящую (по частоте) диаграмму. Передвигая нижнюю границу спектрального окна к верхней границе частотного интервала, получим восходящую диаграмму. Нисходящие диаграммы позволяют выделять слабые эффекты поглощения на сравнительно низких частотах, последовательно удаляя возможные сильные эффекты на более высоких частотах. Восходящие диаграммы, соответственно, позволяют выделять слабые эффекты на более высоких частотах, последовательно удаляя сильные низкочастотные эффекты. Совокупность нисходящих и восходящих диаграмм, построенных для каждого луча радара в каждом наблюдаемом событии, дает достаточно детальную картину наблюдаемого резонансного УНЧ-поглощения.

Примеры нисходящих и восходящих диаграмм решений минимальной задачи показаны на рис. 1. Видно, что почти все решения сосредоточены во множестве, имеющих вид вертикальных линий (или псевдолиний), соответствующих определенным частотам. Такие вертикальные линии можно условно назвать линиями поглощения (имея в виду, что спектр поглощения в действительности сплошной, и истинных спектральных линий в нем нет), а частоты этих линий можно отождествить с минимальными частотами соответствующих резонансных континуумов, в которых происходит резонансное поглощение. При этом большое количество точек в каждой линии указывает на широкополосный характер поглощения. Высота линии указывает на мощность УНЧ-поглощения в каждом континууме. Отметим, что оцениваемая таким образом минимальная резонансная частота соответствует именно фундаментальной гармонике резонанса, поскольку поглощение энергии в этой гармонике сильнее, чем в гармониках более высокого порядка.

На рис. 1а показана нисходящая диаграмма для восьмого луча норвежского радара в ходе события, наблюдавшегося 30.09.2003 г. в вечернем секторе местного времени. Диаграмма выделяет линию значительного поглощения (до 11 дБ) на частоте около 1 мГц и менее сильного (до 8 дБ) на частоте около 4.5 мГц. Сравнение с теоретическими расчетами и экспериментальными наблюдениями позволяет связать поглощение на более высоких частотах с возбуждением полуволновых колебаний магнитных силовых линий на дневной стороне магнитосферы.

На рис. 1б показана нисходящая диаграмма для шестого луча норвежского радара в ходе события, наблюдавшегося 21.10.2003 г. в утреннем секторе местного времени. Диаграмма выделяет линию значительного поглощения (до 10 дБ) на частоте около 5 мГц и слабого поглощения (до 4 дБ) на частоте около 2 мГц. Здесь поглощение на более высоких частотах также можно связать с возбуждением полуволновых колебаний на дневной стороне магнитосферы. Диаграмма выделяет линии отрицательного поглощения на частотах около 3 и 4 мГц. Линии отрицательного поглощения можно связать с широкополосными пульсациями на этих частотах. Кроме того, диаграмма показывает также заметное количество индивидуально расположенных (“оторвавшихся”) точек. Такие точки указывают на математическую некорректность минимальной задачи. По-видимому, возможно ввести понятие кусочно-корректной задачи, и считать задачу корректной только в пределах каждой линии поглощения.

Рисунок 1в показывает восходящую диаграмму для восьмого луча норвежского радара в ходе события, наблюдавшегося 28.10.2003 г. в утреннем секторе местного времени. Это событие наблюдалось за сутки до начала сильной магнитной бури. Диаграмма выделяет линию сильного поглощения (до 16 дБ) на частоте около 2 мГц, линию умеренного поглощения (до 9 дБ) на частоте около 4 мГц и линию сравнительно слабого поглощения (до 7 дБ) на частоте около 7.5 мГц. В этой диаграмме поглощение на частотах выше 4 мГц также можно связать с возбуждением полуволновых колебаний. При этом дополнительное поглощение на частотах выше 7.5 мГц указывает на подключение дополнительного объема возбуждения полуволновых колебаний. В свою очередь, подключение дополнительного объема возбуждения может означать, что на резонансных частотах силовых линий выше 7.5 мГц геомагнитное поле становится практически азимутально симметричным (квазидипольным), и частоту 7.5 мГц можно назвать частотой “симметризации” геомагнитного поля. Чем выше частота “симметризации”, тем выше степень асимметрии геомагнитного поля в плоскости меридиана пол-

день — полночь, и тем ближе к Земле может находиться плазменный слой хвоста магнитосферы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Данная работа анализирует радарные наблюдения, которые проводились в течение одного солнечного оборота в октябре 2003 г. и предшествовали сверхсильной магнитной буре 29 октября. При доплеровских радарных наблюдениях осуществить успешный спектральный анализ данных удастся только в тех случаях, когда интенсивность ионосферных неоднородностей достаточно велика. В противном случае отношение сигнал/шум оказывается слишком малым и происходит значительная потеря спектральной информации. По этим причинам здесь представлены результаты анализа только девятнадцати событий. Для каждого события период наблюдений составлял четыре часа при скважности измерений 20 с. Результаты анализа доплеровских радарных наблюдений сведены в таблицу, в которой для каждого события приведены дата и сектор местного времени, полярность трех составляющих $\{B_x, B_y, B_z\}$ вектора межпланетного магнитного поля (ММП) в GSM-координатах, минимальные и максимальные значения динамического давления солнечного ветра P_{sw} , а также геофизических индексов Dst и AE за период наблюдения (все эти параметры приводятся по часовым данным OMNI), и, наконец, минимальная частота F_{min} резонансного УНЧ-поглощения в низкочастотной (нч) и высокочастотной (вч) ветвях.

Жирным шрифтом в таблице показана частота той ветви, которая доминировала по мощности поглощения. Доминирующей считалась та ветвь, линии поглощения которой доминировали по мощности на более чем четырех радарных лучах (из восьми имевшихся). Если обе ветви доминировали на четырех лучах каждая, то ни одна из ветвей не считалась доминирующей. В тех случаях, когда на одной и той же диаграмме решений минимальной задачи обнаруживалось более одной линии поглощения в какой-либо ветви, в качестве минимальной частоты резонансного поглощения такой ветви выбиралась частота той линии, которая доминировала по мощности поглощения. Такая методика различения ветвей поглощения представляет собой естественное обобщение первоначального полуэмпирического подхода [Бадин 2017, 2019], в котором решение минимальной задачи предполагалось единственным. При сохранении принципа единственности решения методика выделяла бы наиболее сильный эффект, т.е. поглощение, доминирующее по мощности.

Результаты анализа доплеровских радарных наблюдений показаны на рис. 2. На этом рисунке приведены минимальные частоты резонансного поглощения в низкочастотной и высокочастот-

Таблица 1. Гелиогеофизические параметры анализируемых событий

Дата	Сектор MLT	B_x	B_y	B_z	P_{sw} , нПа min/max	K_p	Dst , нТл min/max	AE , нТл min/max	$Fmin$, мГц нч вч
30.09.03	Вечер	+	+	—	1.49/1.65	2	—11/—6	136/361	0.9 ± 0.2 3.5 ± 1.5
01.10.03	Утро	+	+	—	1.62/1.90	2	—17/—10	145/318	1.4 ± 1.0 3.5 ± 1.7
02.10.03	Вечер	+	—	—	0.71/1.83	3	—14/—5	200/409	1.8 ± 0.2 3.5 ± 1.3
03.10.03	Утро	+	—	—	1.62/2.28	5	—33/—27	177/675	1.0 ± 0.5 3.0 ± 0.5
07.10.03	Вечер	+	+	+	1.90/2.50	3	—10/—5	136/437	0.9 3.1 ± 1.5
09.10.03	Утро	+	—	+	1.10/1.37	4	—12/—6	119/449	1.2 ± 0.6 2.7 ± 0.6
13.10.03	Вечер	—	+	±	3.21/3.72	3	—18/+9	264/603	1.6 ± 0.8 3.0 ± 1.9
15.10.03	Утро	—	+	±	2.86/3.63	6	—77/—58	469/886	1.0 ± 0.3 4.3 ± 0.8
16.10.03	Вечер	—	+	—	2.19/2.40	4	—41/—37	341/677	0.8 ± 0.1 3.9 ± 1.0
17.10.03	Утро	—	+	—	2.45/3.14	6	—53/—39	682/999	1.3 ± 0.4 3.2 ± 1.7
18.10.03	Утро	—	±	—	2.31/2.75	4	—49/—23	311/726	1.2 ± 0.7 3.0 ± 0.6
19.10.03	Вечер	—	+	—	2.61/2.89	5	—54/—40	690/1087	1.2 ± 0.4 3.5 ± 1.4
20.10.03	Вечер	—	±	±	3.40/5.23	4	—43/—23	306/769	1.4 ± 0.6 3.0 ± 0.5
21.10.03	Утро	—	+	—	2.12/2.81	4	—45/—37	313/742	1.9 ± 0.7 5.2 ± 0.5
24.10.03	Утро	—	—	—	1.68/2.59	3	—43/—15	330/1103	1.6 ± 0.3 2.5 ± 0.3
25.10.03	Вечер	+	—	±	1.33/4.30	4	—49/—27	171/914	1.8 ± 0.4 3.6 ± 0.8
27.10.03	Утро	+	—	—	0.57/0.72	3	—52/—46	290/572	1.6 ± 0.7 3.4 ± 1.4
28.10.03	Утро	+	—	±	1.70/5.56	4	—18/—1	195/466	1.8 ± 0.4 3.9 ± 1.6
31.10.03	Вечер	+	—	+	7.67/14.36	7	—88/—76	247/519	3.5 ± 0.7 8.0 ± 1.4

Примечания. $Fmin$ — минимальная частота резонансного УНЧ-поглощения в низкочастотной (нч) и высокочастотной (вч) ветвях. Приведены средние значения по восьми лучам радара. Разброс значений показывает наибольшее отклонение (по одному из лучей). Жирным шрифтом показана частота, доминирующая по мощности поглощения.

ной ветвях в зависимости от дня наблюдений (в сутках, считая от первого дня) в течение всего анализируемого периода. Светлые значки соответствуют наблюдениям в утреннем секторе, темные — в вечернем. Крупные значки показывают частоту, которая доминировала по мощности поглощения. При этом треугольники указывают на наличие отрицательной B_z составляющей ММП по часовым данным (в GSM-координатах), а кружочки соответствуют положительным B_z в четырехчасовом интервале наблюдений. Из рисунка видно, что треугольники высокочастотной ветви поглощения расположены, в основном, выше соответствующих кружочков. Такой результат хорошо согласуется с представлениями об эрозии магнитосферы при отрицательных B_z [Арыков и Мальцев, 1998]. При такой эрозии магнитопауза на дневной стороне обычно приближается к Земле, и собственные МГД-частоты магнитных силовых линий должны возрастать. Этот результат служит еще одним доводом в пользу того, что высокочастотную ветвь резонансного УНЧ-поглощения целесообразно связать с полуволновыми собственными колебаниями на дневной стороне

магнитосферы. Штриховая вертикальная линия на рис. 2 показывает начало сильной магнитной бури 29 октября. Последующие результаты относятся к фазе восстановления магнитной бури.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Для минимальных частот резонансного УНЧ-поглощения в табл. 1 для каждого события приведены средние значения частот по восьми радарным лучам и наибольшее отклонение от среднего (по одному из лучей). Ввиду малого числа результатов для каждого события, стандартные отклонения не вычислялись. В отдельных случаях отклонения были сравнительно невелики, однако, во многих случаях отклонения были достаточно большими и достигали 30–50% и более по относительной величине. Можно указать несколько причин, по которым появлялись такие большие отклонения. Во-первых, полнота данных для отдельных лучей была различной, ввиду различной интенсивности ионосферных неоднородностей на разных лучах. Недостаток спектральной информации на отдельных лучах мог приводить к

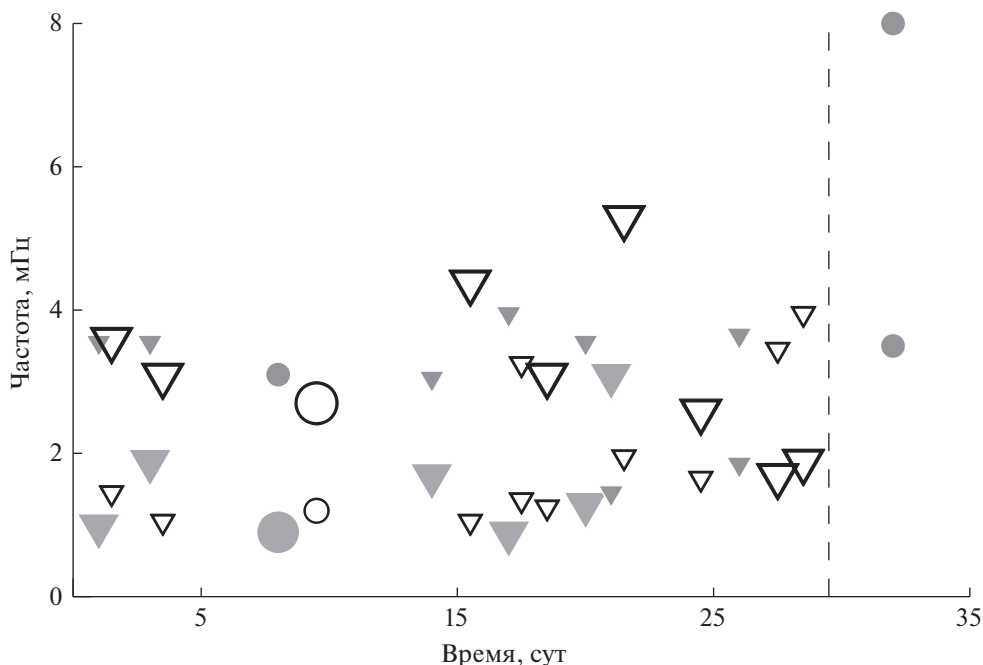


Рис. 2. Минимальные частоты резонансного УНЧ-поглощения в течение одного солнечного оборота, предшествовавшего сильной магнитной буре 29 октября 2003 г. Светлые значки соответствуют наблюдениям в утреннем секторе местного времени, темные — в вечернем. Крупные значки показывают частоту, доминирующую по мощности поглощения. Кружки соответствуют интервалу наблюдений с положительными значениями B_z (по часовым данным), треугольники указывают на наличие отрицательных B_z . Вертикальная штриховая линия показывает начало сильной магнитной бури. Последующие значения частоты соответствуют фазе восстановления.

искажениям результатов. Во-вторых, фоновая спектральная мощность УНЧ-колебаний в магнитосфере могла иметь существенные пространственные неоднородности, и это могло привести к значительному разбросу результатов между различными лучами. В-третьих, временные ряды наблюдений могли быть существенно нестационарными. В таких случаях возможно, например, появление в одной и той же ветви нескольких линий поглощения приблизительно одинаковой мощности, что также может приводить к большому разбросу результатов между различными лучами радара. Отметим, что оценка спектральной мощности по экспериментальным данным посредством численного Фурье-преобразования обычно считается методом достаточно грубым, что и подтверждается полученными результатами.

В течение одного солнечного оборота, предшествовавшего сверхсильной магнитной буре 29 октября 2003 г., гелиогеофизические условия были, в основном, слабо-возмущенными, и сильные магнитные бури не наблюдались. Изменчивость минимальных резонансных частот за этот период была сравнительно небольшой (см. рис. 2). Эта изменчивость выражалась, прежде всего, в незначительном повышении резонансных частот высокочастотной ветви поглощения при отрицательных значениях B_z -составляющей ММП, что

объясняется эффектом эрозии магнитосферы [Арыков и Мальцев, 1998]. Заметное повышение минимальной резонансной частоты в событии 21 октября 2003 г., скорее всего, обусловлено искажением результатов, возникшим вследствие сильных УНЧ-пульсаций (см. рис. 1).

Значительная изменчивость ото дня ко дню наблюдалась в мощности резонансного поглощения в обеих ветвях. Как правило, высокочастотная ветвь поглощения доминировала по мощности при наблюдениях в утреннем секторе местного времени, а в вечернем секторе доминировала низкочастотная ветвь (см. рис. 2). Такая асимметрия поглощения хорошо согласуется с известной асимметрией плазмосферы вдоль меридиана утро—вечер [Нишида, 1980]. Обнаруженная асимметрия может указывать на значительный вклад в низкочастотную ветвь резонансного поглощения собственных колебаний магнитных силовых линий в плазмосфере, особенно в вечернем секторе местного времени. Радиальное распределение альвеновской скорости в магнитосфере таково, что минимальные резонансные частоты во внешней магнитосфере и в плазмосфере близки по величине [Леонович и др., 2015]. Можно предполагать, что возбуждение четвертьволновых собственных колебаний магнитных силовых линий вносит определенный вклад в резонансное погло-

шение низкочастотной ветви. Во всяком случае, значения минимальных резонансных частот низкочастотной ветви поглощения (см. табл. 1) не противоречат численным оценкам частоты четвертьволновых резонансов [Budnik et al., 1998]. При этом поглощение в низкочастотной ветви может быть обусловлено возбуждением колебаний как в плазмосфере, так и во внешней магнитосфере, как на дневной, так и на ночной стороне магнитосферы. Отметим, что поглощение в низкочастотной ветви демонстрирует несколько большую, чем в высокочастотной ветви, изменчивость минимальных резонансных частот по относительной величине. Такую изменчивость можно связать с возбуждением колебаний в различных частях магнитосферы.

На рис. 2 хорошо видна закономерность, характерная для слабо-возмущенных условий, а именно: при наблюдениях в утреннем секторе местного времени доминирует поглощение высокочастотной ветви, а в вечернем секторе — низкочастотной. Однако, эта закономерность была нарушена за 1–2 дня до начала сильной магнитной бури. В эти дни поглощение низкочастотной ветви доминировало по мощности при наблюдениях в утреннем секторе местного времени. Аналогичный эффект отмечался ранее [Бадин, 2016, 2018]. Доминирование той или иной ветви резонансного поглощения может означать, что увеличился объем возбуждения этой ветви собственных колебаний в магнитосфере и/или уменьшился объем возбуждения другой ветви колебаний. Можно предложить ряд физических механизмов, которые могли бы объяснить подобный эффект. Во-первых, перемещение магнитного потока с дневной стороны магнитосферы на ночную сторону [Нишида, 1980], которое могло бы уменьшить объем возбуждения высокочастотной ветви колебаний на дневной стороне и увеличить объем возбуждения низкочастотной ветви на ночной стороне. Такое перемещение обычно происходит вследствие пересоединения магнитных силовых линий при отрицательных значениях B_z -составляющей ММП. Однако можно отметить, что утром 28 октября не наблюдалось стабильных длительных периодов отрицательных B_z , в то время как в предшествующие дни такие периоды наблюдались, но не приводили к доминированию низкочастотного поглощения в утреннем секторе местного времени. Во-вторых, возможно усиление плазмосферного резонансного поглощения низкочастотной ветви, обусловленного затуханием Ландау на тепловых электронах плазмплаузы [Leonovich et al., 2021]. В этом случае дополнительный нагрев электронов плазмплаузы может сопровождаться усилением активности субавроральных красных дуг, и такой эффект можно обнаружить при оптических наблюдениях верхней атмосферы. В-третьих, уменьшение объема воз-

буждения полуволновых колебаний магнитных силовых линий и увеличение объема возбуждения четвертьволновых колебаний возможно при значительном уменьшении поперечной проводимости авроральной ионосферы, что, в свою очередь, возможно при значительном ослаблении высыпаний энергичных электронов в ионосферу (“затишье перед бурей”). Ослабление высыпаний энергичных электронов может означать накопление в магнитосфере избыточной энергии. Не исключено, что сверхсильные бури в магнитосфере Земли происходят при определенных сочетаниях воздействия солнечного ветра и внутреннего состояния самой магнитосферы.

Приведенные в табл. 1 минимальные частоты резонансного поглощения показывают значительный разброс значений таких частот между различными лучами радара. В то же время значения, усредненные по всем лучам, демонстрируют сравнительно слабую изменчивость. С другой стороны, сильное по мощности резонансное поглощение указывает на то, что данный эффект носит глобальный характер, т.е. возбуждение собственных колебаний, ответственных за поглощение, происходит в достаточно большом объеме магнитосферы, сопоставимом с размерами последней. В таком случае целесообразно наблюдать резонансное УНЧ-поглощение глобально. Иными словами, целесообразно наблюдать данное явление одновременно многими инструментами, возможно расположенными на разных долготах. С этой точки зрения большой интерес представляет проект создания Национального гелиогеофизического комплекса РАН [Жеребцов, 2020]. Несмотря на то, что геофизические наблюдения с помощью когерентных ионосферных радаров начались в России сравнительно недавно, см., например, [Mager et al., 2015], проект Национального гелиогеофизического комплекса включает развертывание сети когерентных ионосферных радаров [Бернгардт и др., 2020].

В заключение сформулируем основные выводы данной работы.

1. По данным доплеровских радарных наблюдений авроральной электроструи выделены высокочастотная и низкочастотная ветви резонансного УНЧ-поглощения.
2. В слабовозмущенных условиях изменчивость резонансного УНЧ-поглощения обусловлена в первую очередь вариациями мощности поглощения в обеих ветвях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит М.Г. Деминова за полезные обсуждения.

Работа радаров STARE обеспечивалась Институтом аэронавтики им. Макса Планка (Германия) и Финским

метеорологическим институтом (Финляндия) в кооперации с университетом Тронхейма (Норвегия).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 20-05-00050.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Арыков А.А., Мальцев Ю.П.* Причины эрозии дневной магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 4. С. 138–142. 1998.
- *Бадин В.И.* Возбуждение и поглощение УНЧ-колебаний по доплеровским радарным наблюдениям в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 1. С. 93–101. 2016.
<https://doi.org/10.7868/S0016794016010028>
- *Бадин В.И.* Резонансное УНЧ-поглощение в условиях магнитной бури // Солнечно-земная физика. Т. 3. № 1. С. 79–87. 2017.
<https://doi.org/10.12737/21428>
- *Бадин В.И.* Резонансное УНЧ поглощение при различных направлениях межпланетного магнитного поля / Астрономия 2018. Том 2. Солнечно-земная физика — современное состояние и перспективы. Ред. В.Н. Обридко. М.: ИЗМИРАН. С. 19–22. 2018.
<https://doi.org/10.31361/eaas.2018-2.004>
- *Бадин В.И.* Резонансное УНЧ-поглощение по авроральным доплеровским радарным наблюдениям // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 2. С. 219–226. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019020020>
- *Бернгардт О.И., Куркин В.И., Кушнарев Д.С., Гркович К.В., Федоров Р.Р., Орлов А.И., Харченко В.В.* Декаметровые радары ИСЗФ СО РАН // Солнечно-земная физика. Т. 6. № 2. С. 79–92. 2020.
<https://doi.org/10.12737/szf-62202006>
- *Данжи Дж.В.* Магнитогидродинамические волны / Геофизика. Околоземное космическое пространство. М.: Мир. С. 417–430. 1964.
- *Жеребцов Г.А.* Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения // Солнечно-земная физика. Т. 6. № 2. С. 6–18. 2020.
<https://doi.org/10.12737/szf-62202001>
- *Леонович А.С., Мазур В.А., Козлов Д.А.* МГД-волны в геомагнитном хвосте: обзор // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 1. С. 4–22. 2015.
<https://doi.org/10.12737/7168>
- *Нишида А.* Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир. 299 с. 1980.
- *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука. 287 с. 1986.
- *Allan W., Knox F.B.* A dipole field model for axisymmetric Alfvén waves with finite ionosphere conductivities // Planet. Space Sci. V. 27. № 1. P. 79–85. 1979a.
- *Allan W., Knox F.B.* The effect of finite ionosphere conductivities on axisymmetric toroidal Alfvén wave resonances // Planet. Space Sci. V. 27. № 7. P. 939–950. 1979b.
- *Alperovich L.S., Fedorov E.N.* Hydromagnetic waves in the magnetosphere and the ionosphere. Springer, N.Y. 421 p. 2007.
- *Anderson B.J., Engebretson M.J., Zanetti L.J.* Distortion effects in spacecraft observations of MHD toroidal standing waves: theory and observations // J. Geophys. Res. V. 94. № A10. P. 13425–13445. 1989.
- *Budnik F., Stellmacher M., Glassmeier K.-H., Buchert S.C.* Ionospheric conductance distribution and MHD wave structure: observation and model // Ann. Geophysicae. V. 16. № 1. P. 140–147. 1998.
- *Chen L., Hasegawa A.* A theory of long-period magnetic pulsations: 1. Steady state excitation of field line resonance // J. Geophys. Res. V. 79. № A7. P. 1024–1032. 1974.
- *Cheng C.Z., Zaharia S.* Field line resonances in quiet and disturbed time three-dimensional magnetospheres // J. Geophys. Res. V. 108. № A1. 1001. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009471>
- *Cummings W.D., O'Sullivan R.J., Coleman P.J.* Standing Alfvén waves in the magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 74. № A3. P. 778–793. 1969.
- *Greenwald R.A., Weiss W., Nielsen E., Thomson N.R.* STARE: a new radar auroral backscatter experiment in northern Scandinavia // Radio Sci. V. 13 № 6. P. 1021–1039. 1978.
- *Lanzerotti L.J., Shono A., Fukunishi H., MacLennan C.G.* Long-period hydromagnetic waves at very high geomagnetic latitudes // J. Geophys. Res. V. 104. № A12. P. 28423–28435. 1999.
- *Lee D.-H., Lysak R.L.* Magnetospheric ULF wave coupling in the dipole model: the impulsive excitation // J. Geophys. Res. V. 94. № A12. P. 17097–17103. 1989.
- *Leonovich A.S., Kozlov D.A., Vlasov A.A.* Kinetic Alfvén waves near a dissipative layer // J. Geophys. Res. Space Phys. V. 126 e2021JA029580. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2021JA029580>
- *Mager P.N., Berngardt O.I., Klimushkin D.Yu., Zolotukhina N.A., Mager O.V.* First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 130–131. P. 112–126. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.05.017>
- *Obana Y., Waters C.L., Sciffer M.D., Menk F.W., Lysak R.L., Shiokawa K., Hurst A.W., Petersen T.* Resonance structure and mode transition of quarter-wave ULF pulsations around the dawn terminator // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 120. P. 4194–4212. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021096>
- *Southwood D.J.* Some features of field line resonances in the magnetosphere // Planet. Space Sci. V. 22. № 3. P. 483–491. 1974.
- *Urban K.D., Gerrard A.J., Bhattacharya Y., Ridley A.J., Lanzerotti L.J., Weatherwax A.T.* Quiet time observations of the open-closed boundary prior to the CIR-induced storm of 9 August 2008 // Space Weather. V. 9. S11001. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011SW000688>
- *Yumoto K., Pilipenko V., Fedorov E., Kurneva N., Shiokawa K.* The mechanisms of damping of geomagnetic pulsations // J. Geomagn. Geoelectr. V. 47. № 1. P. 163–176. 1995.