

УДК 550.385.1

РЕЗОНАНСНОЕ УНЧ-ПОГЛОЩЕНИЕ ПО АВРОРАЛЬНЫМ ДОПЛЕРОВСКИМ РАДАРНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2019 г. В. И. Бадин*

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

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

Поступила в редакцию 07.06.2018 г.

После доработки 17.09.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

В работе анализируются доплеровские измерения скорости дрейфа электронов в авроральной ионосфере, полученные радаром STARE в слабозмущенных условиях. Прежде всего, доплеровские измерения усредняются вдоль каждого радарного луча. Затем спектральная плотность мощности (СПМ) усредненного сигнала каждого луча вычисляется как функция частоты посредством дискретного преобразования Фурье. На всех лучах радара обнаружено глубокое ступенчатое падение (около 10 дБ) спектральной мощности в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне. Это падение СПМ интерпретируется как резонансное УНЧ-поглощение, которое происходит в континууме собственных частот стоячих альвеновских волн, возбуждаемых на геомагнитных силовых линиях. Предложен вариационный анализ, моделирующий падение СПМ ступенчатым профилем средней спектральной мощности. Такой анализ обеспечивает аппроксимацию падения СПМ, вычисленного по экспериментальным данным, модельным ступенчатым профилем, построенным методом наименьших квадратов. Таким образом для каждого радарного луча определяется частота, на которой происходит ступенчатое падение средней СПМ, и эта частота интерпретируется как минимальная частота резонансного УНЧ-поглощения, найденная данным лучом в данном авроральном событии. После усреднения по всем лучам радара, эта частота для анализируемого события составила 4.9 ± 0.2 мГц.

DOI: 10.1134/S0016794019020020

1. ВВЕДЕНИЕ

Происхождение ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний магнитных и электрических полей в околоземном космическом пространстве часто связывают с возбуждением магнитогеодинамических (МГД) резонансов в магнитосферной плазме, замороженной в геомагнитное поле. Возбуждение резонансных колебаний магнитных силовых линий поверхностными МГД-волнами анализировалось теоретически [Southwood, 1974; Chen and Hasegawa, 1974]. Дальнейшие теоретические исследования обратили внимание на такую важную сторону этого явления как поглощение энергии исходной МГД-волны посредством возбуждения резонансных колебаний локальных магнитных силовых линий [Гульельми и Потапов, 1984; Kivelson and Southwood, 1986; Cheng, 2003]. Численные расчеты резонансных МГД-частот проводились как для дипольной [Lee and Ly-sak, 1989], так и недипольной [Cheng and Zaharia, 2003] моделей геомагнитного поля. Эти расчеты показали, что типичные значения наименьших резонансных частот магнитных силовых линий в

спокойной дневной магнитосфере должны составлять 3–5 мГц.

Собственные моды резонансов магнитных силовых линий, рассчитанные в МГД-приближении, показали, что амплитуда электрического поля резонансных колебаний в E -слое ионосферы достаточно мала и стремится к нулю, в отличие от большой амплитуды собственных колебаний магнитного поля на тех же высотах [Cumplings et al., 1969]. На первый взгляд применимость процитированных выше расчетов весьма ограничена использованным приближением бесконечно большой ионосферной проводимости, что допускает в качестве собственных мод только так называемые полуволновые колебания, которые представляют собой стоячие альвеновские волны с узлами электрического поля в обеих сопряженных ионосферах. При этом условие резонанса состоит в том, что на длине магнитной силовой линии между двумя ионосферами должно укладываться целое число полуволн. Действительно, при достаточно низкой проводимости одной из сопряженных ионосфер, собственные моды оказываются так

называемыми четвертьволновыми колебаниями, у которых на длине магнитной силовой линии укладывается нечетное число четвертей длины волны, и которые имеют пучность электрического поля в слабопроводящей ионосфере [Allan and Knox, 1979a]. Однако для возбуждения четвертьволновых собственных колебаний необходимо, чтобы проводимость Педерсена в одной из сопряженных ионосфер была ниже, чем волновая проводимость магнитосферы [Alperovich and Fedorov, 2007]. Выполнение этого условия в авроральной ионосфере практически невозможно даже при слабых, тем более при сильных магнитных возмущениях [Wallis and Budzinski, 1981; Hardy et al., 1987]. Таким образом, наиболее вероятными резонансными УНЧ-колебаниями в возмущенной авроральной магнитосфере оказываются полуволновые моды с узлами электрического поля в E -слое ионосферы.

Учет конечной проводимости ионосферы приводит к значительному затуханию основной гармонике резонансных полуволновых колебаний, как только ионосферная проводимость оказывается достаточно низкой [Newton et al., 1978]. Конечная проводимость ионосферы снижает добротность магнитосферного МГД-резонатора. Теоретические оценки добротности Q такого резонатора в зависимости от омических потерь в ионосфере показывают, что для высоких широт и невысокой ионосферной проводимости, типичной для полярной зимы, $Q \sim 1$ для основной гармонике полуволновых колебаний [Yumoto et al., 1995]. Кроме ионосферной омической диссипации, возможны значительные недиссипативные потери энергии резонансных колебаний [Poulter and Allan, 1985]. Дополнительные потери энергии приведут к еще меньшим значениям Q , и мы вправе ожидать, что добротность УНЧ-резонатора во внешней магнитосфере достаточно мала. В свою очередь, низкая добротность означает, что средняя амплитуда резонансного колебания не будет много больше амплитуды нерезонансных (вынужденных) колебаний. При данных обстоятельствах искомое электрическое поле резонансного колебания, измеряемое вблизи узла стоячей альвеновской волны, скорее всего, окажется под шумами, что сделает измерение искомой величины едва ли возможным.

Принимая радиоволны, рассеянные ионосферными неоднородностями, высокочастотные радары осуществляют доплеровские измерения скорости поперечного дрейфа ионосферной плазмы, тем самым обеспечивая экспериментальную диагностику для изучения УНЧ-колебаний поперечного электрического поля [Greenwald et al., 1978]. Высокие амплитуды пульсаций $Pc5$, обнаруженные в высокоширотных доплеровских радарных данных на частотах 2.7, 3.5 и 3.9 МГц, были интерпретированы как наблюдения резо-

нансов магнитных силовых линий при выполнении двух важных предположений о том, что, во-первых, резонансные стоячие альвеновские волны имели в ионосфере пучность электрического поля, и, во-вторых, интегральные ионосферные проводимости во время этих наблюдений составляли около 10 См [Walker et al., 1979]. Однако дальнейшие теоретические исследования [Allan and Knox, 1979b; Alperovich and Fedorov, 2007] показали, что эти два предположения несовместимы между собой. А именно, при ионосферной проводимости 10 См стоячие резонансные альвеновские волны имеют узел электрического поля в E -слое ионосферы. Более того, наблюдения, представленные в работе [Walker et al., 1979], проводились в условиях полярной зимы, когда зенитный угол Солнца был близок к 90° . Ионосферные проводимости, рассчитанные для этих условий по модели IRI, составляют 1–2 См (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond/sigcal/index/html>). Столь значительное расхождение между предполагаемым и модельным значением проводимости, вероятно, указывает на интенсивное высыпание энергичных частиц, которые могли бы обеспечить необходимую высокую проводимость. В том же диапазоне частот наблюдались возмущения с высокими азимутальными числами [Allan et al., 1982], что характерно для возбуждения волн энергичными протонами. Дрейфово-компрессионные УНЧ-волны, возбуждаемые энергичными магнитосферными протонами, регулярно наблюдаются радарными SuperDARN [Mager et al., 2015; Челпанов и др., 2016]. Отметим одновременные наблюдения двумя радарными различными ультранизких частот [James et al., 2016] на практически одной и той же геомагнитной широте, т.е. практически на одной L -оболочке (относительная разница по частоте составляла около 40% при относительной разнице по L -параметру менее 7%), что едва ли совместимо с представлениями о резонансах магнитных силовых линий. Кроме того, узкополосная фильтрация доплеровских радарных данных обнаружила УНЧ-возмущения, геометрия которых несовместима с представлениями о резонансах магнитных силовых линий [Бадин, 2016].

В течение десятилетий наблюдения вариаций магнитного поля с помощью наземных и орбитальных магнитометров давали нам основную информацию об УНЧ-колебаниях. В среднем экспериментальные магнитные наблюдения резонансов силовых линий дают более высокие значения резонансных частот, чем доплеровские радарные измерения, и эти расхождения не удается объяснить случайной изменчивостью геофизических параметров наблюдаемых событий. Например, спутниковые магнитные наблюдения [Anderson et al., 1989] показали, что резонансные частоты тороидальных стоячих волн превышают

величину 5 мГц. Антарктические магнитные УНЧ-наблюдения, осуществляемые вблизи геомагнитного полюса, позволяют оценивать наименьшую частоту резонанса магнитных силовых линий, т.е. собственную частоту наиболее длинных магнитных силовых линий на дневной стороне магнитосферы. А именно, спектральный анализ антарктических магнитных данных показывает, что частоты остаточной спектральной мощности (оставшейся после вычитания фонового уровня спектральной мощности) ограничены снизу [Lanzerotti et al., 1999], в то время как периоды остаточной спектральной мощности ограничены сверху [Urban et al., 2011]. Найденная посредством такого анализа нижняя частотная граница величиной около 5 мГц интерпретируется как частота стоячих альвеновских волн, возбуждаемых на “последних замкнутых магнитосферных силовых линиях”.

Резюмируя процитированные выше результаты, мы приходим к выводу о том, что экспериментальная идентификация резонансов магнитных силовых линий остается актуальной проблемой магнитосферных исследований. Имеются значительные расхождения между магнитометрическими и доплеровскими радарными оценками собственных частот магнитных силовых линий, и эти расхождения требуют соответствующих усовершенствований экспериментальных методов и/или методов обработки данных. Несмотря на ряд предложенных специальных методик, например [Piliipenko et al., 2012], проблема радарного обнаружения резонансов магнитных силовых линий остается в значительной мере нерешенной. Учитывая то обстоятельство, что высокоширотные резонансы магнитных силовых линий, как правило, имеют узлы электрического поля в ионосфере, в то время как добротность магнитосферного УНЧ-резонатора остается низкой, мы вправе ожидать, что искомые резонансные сигналы в доплеровских радарных данных окажутся слишком слабыми для успешного измерения. Поэтому мы сосредоточим внимание на явлении резонансного поглощения фоновых УНЧ-волн, наблюдаемых радаром когерентного рассеяния.

2. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Анализируется авроральное событие 30 ноября 2004 г., которое наблюдалось с 13:00 до 17:00 UT. Это событие характеризуется умеренной авроральной активностью с $AE < 200$ нТл и низкими значениями индексов $|Dst| < 21$ нТл и $Kp < 3$, северным направлением межпланетного магнитного поля (ММП) с составляющей $B_z > 0$ и динамическим давлением солнечного ветра (СВ) около 3 нПа. Гелиогеофизические параметры анализируемого события (по данным OMNI) представле-

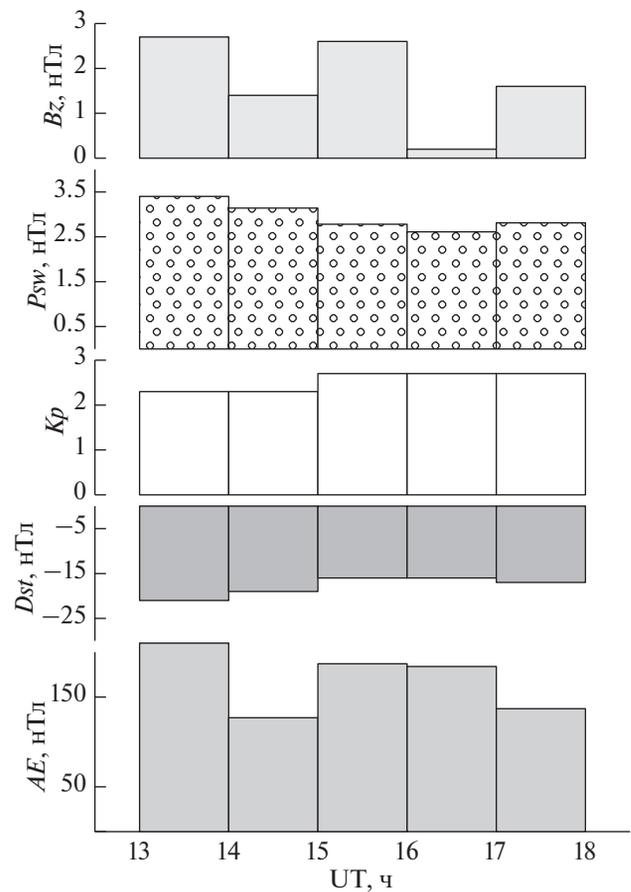


Рис. 1. Гелиогеофизические параметры изучаемого аврорального события. Сверху вниз представленные диаграммы показывают B_z -составляющую ММП, динамическое давление солнечного ветра P_{sw} , а также геофизические индексы Kp , Dst и AE как функции времени UT (в часах).

ны на рис. 1. Поле зрения радара находилось в послеполуденном и вечернем секторах MLT, магнитные силовые линии которых проецировались на вечерний фланг магнитосферы. Несмотря на то, что магнитосфера находилась в высокоскоростном потоке солнечного ветра, геомагнитные условия были близки к спокойным. Достаточно сильная магнитная буря наблюдалась за десять дней до рассматриваемого события.

Радары STARE измеряли проекции скорости дрейфа электронов на восемь лучей, которые представляли собой восемь угловых направлений приема рассеиваемых радиоволн. Угловые расстояния между соседними лучами составляли 3.6° . Каждый луч обеспечивал отсчет пятидесяти дальностей, отстоящих друг от друга на 15 км [Greenwald et al., 1978]. Таким образом, поле зрения радара состояло из 400 точек, и измерения во всех этих точках записывались каждые 20 с. Однако следует отметить, что многие из этих точек часто не давали никакой полезной информации из-за

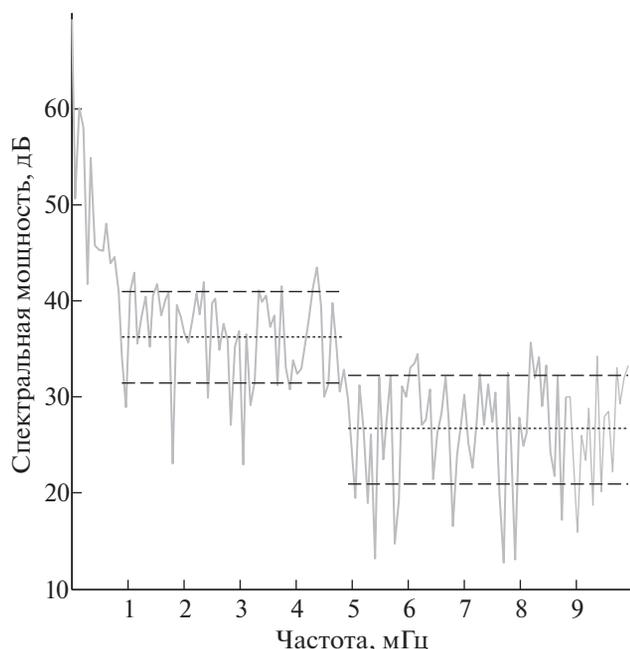


Рис. 2. Спектральная плотность мощности (серая кривая), рассчитанная посредством дискретного преобразования Фурье средней скорости дрейфа, измеренной вторым радарным лучом. Штриховые прямые показывают средние значения спектральной мощности в соответствующих частотных интервалах. Сплошные прямые показывают стандартные отклонения.

очень низкого отношения сигнал/шум, что, в свою очередь, было следствием очень низких амплитуд ионосферных неоднородностей, обеспечивавших рассеяние радиоволн. Во многих случаях доплеровские данные норвежского радара STARE были гораздо более информативными, чем данные финского радара. В данной работе анализируются только данные норвежского радара.

Обработка радарных данных по доплеровским смещениям частоты проводилась с использованием дискретного преобразования Фурье (ДПФ) измеренных проекций скорости дрейфа электронов на каждый радарный луч. Вычисление ДПФ дает количественную оценку спектральной плотности мощности (СПМ) сигнала как функции частоты. Для того, чтобы уменьшить влияние шумов и неоднородностей УНЧ-фона, данные предварительно усреднялись вдоль каждого радарного луча. Такое усреднение допустимо, поскольку по доплеровским смещениям частоты определяется скорость дрейфа плазмы вдоль каждого радарного луча. На рисунке 2 приведена спектральная мощность ДПФ сигнала второго радарного луча (номер луча отсчитывается от левого/полярного края поля зрения радара). На этом рисунке хорошо видно ступенчатое падение СПМ вблизи частоты 5 МГц. Действительно, при малом приращении частоты спектральная мощность убывает

на порядок величины (около 10 дБ). Такое значительное падение СПМ подтверждается средними значениями спектральной мощности (показаны штриховыми прямыми на рис. 2), вычисленными для частот ниже и выше 5 МГц, соответственно. Сплошные прямые на рис. 2 показывают стандартные отклонения. Наиболее вероятное объяснение обнаруженного падения СПМ состоит в резонансном поглощении наблюдаемых колебаний скорости дрейфа посредством возбуждения стоячих альвеновских волн, т.е. резонанса магнитных силовых линий. В процессе такого поглощения энергия, связанная с дрейфовыми УНЧ-колебаниями ионосферной плазмы, преобразуется в энергию продольных токов резонансов магнитных силовых линий. Поскольку магнитопауза ограничивает длину магнитных силовых линий на дневной стороне магнитосферы, континуум резонансных частот магнитных силовых линий ограничен снизу. Это означает, что наблюдаемая частота резонансного поглощения должна иметь минимум. В соответствии со спектром мощности, представленным на рис. 2, можно ожидать, что минимальное значение частоты резонансного поглощения в изучаемом авроральном событии было около 5 МГц.

Для количественной оценки минимальной частоты резонансного поглощения используется вариационный анализ, который включает следующее. Прежде всего, вводится функционал D , который представляет собой суммарное квадратичное отклонение спектральной мощности от ее средних значений. Для произвольной частоты f_m из анализируемого частотного интервала (от 1 до 10 МГц, причем индекс m пробегает значения от 1 до $N - 1$) функционал D принимает вид

$$D(f_m) = \sum_{i=1}^m \left(S_i - \sum_{i=1}^m S_i / m \right)^2 + \sum_{i=m+1}^N \left[S_i - \sum_{i=m+1}^N S_i / (N - m) \right]^2, \quad (1)$$

где S_i представляют собой индивидуальные спектральные мощности усредненного доплеровского сигнала каждого луча внутри анализируемого частотного интервала. Вариационный анализ находит такую частоту f_m , которая доставляет абсолютный минимум функционалу D (в анализируемом частотном интервале). Найденная таким методом частота f_m интерпретируется как минимальная частота резонансного УНЧ-поглощения, наблюдаемого каждым лучом радара. Отметим, что функционал (1) выражается через две дисперсии, для нижних и верхних частот соответственно, и в итоге $D(f_m)$ вычисляется с помощью стандартных программных средств обработки данных. На рисунке 3 функционал D как функция частоты f_m показан для двух соседних лучей радара. Для каждо-

го луча видны отчетливые минимумы, которые близки по величине, но слегка различаются по частоте. В данном исследовании абсолютный минимум функционала D выбирался для всех лучей радара.

Спектральные мощности ДПФ обычно содержат сильные стохастические составляющие, обусловленные численным интегрированием на конечных временных интервалах. По этим причинам, значимыми оказываются только усредненные или сглаженные значения спектральной мощности. Как правило, анализ СПМ использует спектральные окна для сглаживания вычислений ДПФ. В данном исследовании использование спектральных окон нецелесообразно, поскольку спектральное окно сгладит и падение СПМ, превратив его из ступенчатого в пологое, а это понизит точность оценки f_m и поставит под сомнение резонансное происхождение наблюдаемого эффекта. Фактически, используемый здесь вариационный анализ моделирует наблюдаемый эффект ступенчатым профилем спектральной мощности. Такая модель вполне применима к континууму собственных частот резонанса магнитных силовых линий (по крайней мере, в ограниченном диапазоне частот). Отыскание минимума функционала D обеспечивает аппроксимацию методом наименьших квадратов спектральной мощности ДПФ доплеровских данных ступенчатой моделью СПМ.

На рисунке 4 приведена сводка спектральных мощностей ДПФ (серые кривые), вычисленных для всех радарных лучей. Для кривых, показанных на рис. 4 снизу вверх, полярные лучи радара сменяются экваториальными. Для удобства представления результатов, к каждой вышележащей кривой добавлены 40 дБ по сравнению с нижележащей. Для получения количественных оценок минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения, наблюдаемого каждым радарным лучом, использован вариационный анализ, минимизирующий функционал D . Иными словами, для каждого луча радара получена наилучшая аппроксимация спектральной мощности ДПФ доплеровских данных ступенчатой моделью СПМ. Таким образом, частота f_m , найденная для каждого луча, обеспечивает экспериментальную оценку минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения, наблюдаемого радаром. Эти минимальные частоты отмечены на рис. 4 ступенчатым падением величины средней спектральной мощности (показана штриховыми прямыми). Из рисунка видно, что все лучи радара дают достаточно близкие значения минимальной частоты, которую можно усреднить по всем лучам, и получить окончательную оценку 4.9 ± 0.2 мГц. Указанная погрешность включает все восемь значений ми-

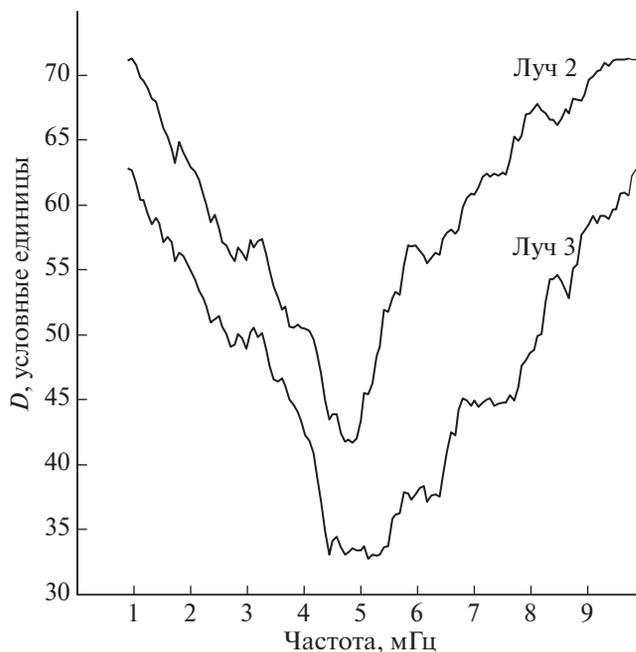


Рис. 3. Суммарное квадратичное отклонение D спектральной мощности от ее средних значений, рассчитанное как функция частоты для двух соседних лучей радара.

нимальной частоты, полученной для всех лучей радара.

3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Для альвеновской скорости во внешней магнитосфере порядка 10^3 км/с и частоты 5×10^{-3} Гц, характерная длина МГД-волны составляет 2×10^5 км. Для волн такой длины магнитосфера представляет собой сравнительно небольшой и сильно неоднородный объект, в котором солнечный ветер возбуждает продольно-поперечные колебания (исходную МГД-волну). Кроме внешних источников УНЧ-волн, возможны и внутриманитосферные источники, например, связанные с энергичными протонами. Попадая в ионосферу, УНЧ-волны различных источников формируют фоновый уровень колебаний поперечного электрического поля или скорости дрейфа ионосферных электронов. Такие колебания обнаруживаются доплеровскими радарными наблюдениями в ионосфере, а их фоновый уровень оценивается спектральной плотностью мощности ДПФ радарных данных. Проведенный анализ доплеровского радарного сигнала показывает, что интенсивность дрейфовых УНЧ-колебаний в ионосфере резко падает на частотах, превышающих некоторую минимальную частоту. При этом на частотах ниже минимальной интенсивность колебаний остается высокой. Резкое ступенчатое падение СПМ радарных наблюдений на частотах, превы-

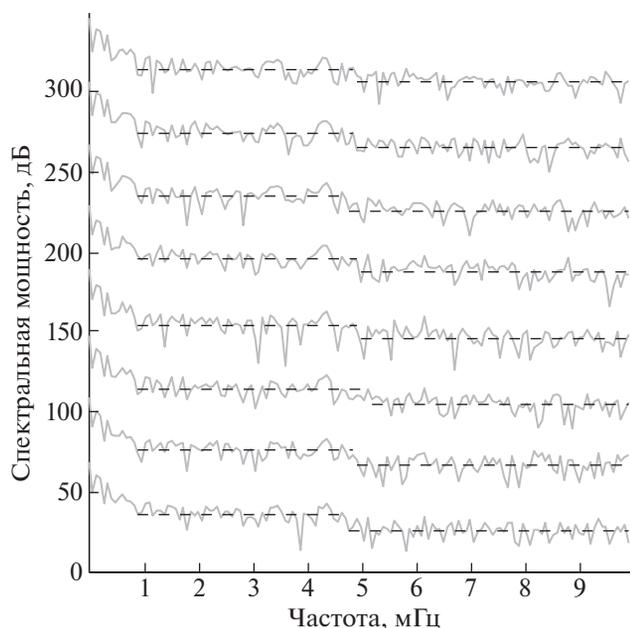


Рис. 4. Сводка спектральных мощностей (серые кривые), вычисленных для всех лучей радара. Каждая штриховая прямая показывает среднюю спектральную мощность в своем частотном интервале. Снизу вверх полярные лучи радара уступают место экваториальным. Для удобства представления данных к каждой вышележащей кривой добавлены 40 дБ по отношению к нижележащей.

шающих определенную минимальную частоту, может означать, что энергия дрейфовых колебаний плазмы переходит в энергию других колебаний, которых радар “не видит”. Альтернативные объяснения этого эффекта могут состоять в том, что либо исходные волны на частотах выше минимальной не попадают в ионосферу, либо энергия таких колебаний переходит в другие формы, например в тепло.

Колебания локальных магнитных силовых линий внутри магнитосферы образуют собственные моды магнитосферного МГД-резонатора и формируют континуум собственных частот. Резонанс возможен при совпадении частоты исходной МГД-волны с частотой собственных колебаний резонатора. В условиях резонанса происходит возбуждение собственных колебаний до значительной амплитуды. При этом энергия собственных колебаний черпается из энергии возбуждающих волн, в частности, из энергии исходной МГД-волны, а интенсивность возбуждающих волн падает. В этом состоит явление резонансного поглощения. Такое поглощение энергии УНЧ-волны происходит, как только частота волны превышает минимальную резонансную частоту и попадает в резонансный континуум. Собственные моды колебаний магнитных силовых линий представляют собой стоячие альвеновские волны,

причем в авроральных широтах эти волны, как правило, имеют узлы электрического поля в ионосфере. По этой причине собственные колебания магнитных силовых линий практически не дают вклада в фоновый уровень колебаний скорости дрейфа в ионосфере. В этом случае падение СПМ доплеровских радарных наблюдений в ионосфере обнаруживает падение интенсивности волн, возбуждающих собственные колебания магнитных силовых линий, и тем самым позволяет экспериментально наблюдать явление резонансного УНЧ-поглощения в магнитосфере. Поскольку собственные частоты составляют континуум, нет возможности наблюдать отдельные линии поглощения, но возможно оценить нижнюю границу континуума, т.е. минимальную резонансную частоту магнитных силовых линий.

Предложенную интерпретацию результатов наблюдений можно считать наиболее вероятной, если не удастся найти альтернативного и более убедительного объяснения полученным результатам. Одно из предполагаемых альтернативных объяснений падения СПМ доплеровского сигнала может быть связано с эффектами распространения магнитозвуковых волн от магнитопаузы в глубину магнитосферы, а именно с существованием областей непрозрачности, в которых интенсивность таких волн падает. Однако общепринятое представление о распространении магнитозвуковых волн в магнитосфере свидетельствует о том, что волны более высоких частот проникают глубже в магнитосферу, в то время как волны более низких частот отражаются, по крайней мере, в приближении ВКБ или геометрической оптики [Леонович и Мазур, 2008]. В любом предполагаемом случае доминирования эффектов распространения магнитозвуковых волн, ступеньки спектральной мощности, показанные на рис. 2 и 4, были бы повернуты в противоположную сторону, и частоты этих ступенек должны были бы расти от полярных лучей радара к экваториальным. Однако ничего подобного в имеющихся данных не обнаружено. Следовательно, наблюдаемое падение спектральной мощности доплеровских измерений не может быть обусловлено распространением магнитозвуковых волн от магнитопаузы в глубину магнитосферы.

Другое предполагаемое альтернативное объяснение полученных результатов может быть связано с омической диссипацией волновой энергии. Омическая диссипация УНЧ-волн в ионосфере пропорциональна $\Sigma_p |E|^2$, где E представляет собой амплитуду поперечного электрического поля в ионосфере, а Σ_p — интегральную проводимость Педерсена, которая не зависит от частоты. Доплеровские наблюдения измеряют проекции скорости дрейфа электронов на лучи радара. Каждая такая проекция определяет ту составляющую

электрического поля, которая перпендикулярна геомагнитному полю и радарному лучу. В свою очередь, углы между радарными лучами варьируют от 3.6° до примерно 30° . Если отбросить маловероятный случай линейной поляризации УНЧ-волн для всех лучей радара, омическая диссипация на данной частоте окажется пропорциональной спектральной мощности доплеровского сигнала на этой частоте. Такие омические потери не могут объяснить обнаруженное глубокое падение спектральной мощности с ростом частоты. Действительно, экспериментальные данные не обнаруживают подъема СПМ на более высоких частотах по сравнению с СПМ на низких частотах (см. рис. 2 и 4). Следовательно, омические потери на более высоких частотах не превосходят таковые на низких частотах.

Найденное значение минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения около 5 мГц хорошо согласуется с оценками наименьшей частоты резонанса магнитных силовых линий, полученными по наблюдениям дневной магнитосферы орбитальными и наземными магнитометрами [Anderson et al., 1989; Lanzerotti et al., 1999; Urban et al., 2011]. Частота 5 мГц не противоречит результатам численных расчетов в приближении бесконечно большой ионосферной проводимости [Lee and Lysak, 1989; Cheng and Zaharia, 2003]. Это согласие позволяет заключить, что в изучаемом событии четвертьволновые резонансные моды в высокоширотной магнитосфере не возбуждались из-за достаточно высокой ионосферной проводимости.

Учитывая хорошее согласие найденной минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения с частотами стоячих альвеновских волн на “последней замкнутой магнитосферной силовой линии” [Lanzerotti et al., 1999; Urban et al., 2011] и учитывая тот факт, что наш анализ не выявил какого-либо регулярного роста минимальной частоты резонансного поглощения при переходе от полярных радарных лучей к экваториальным, можно заключить, что найденная минимальная частота резонансного УНЧ-поглощения соответствует частотам стоячих альвеновских волн резонанса наиболее длинных магнитных силовых линий, примыкающих к магнитопаузе (на дневной стороне магнитосферы). Однако внутримангнитосферные источники УНЧ-сигналов (например, связанные с энергичными частицами) могут поставить такой вывод под сомнение, и необходимы дальнейшие исследования для того, чтобы сделать окончательные выводы. Тем не менее, наиболее вероятное происхождение ступенчатого падения спектральной мощности с частотой обусловлено резонансным поглощением в частотном континууме, и достаточно сложно найти другое объяснение. Аналогичное поведение СПМ доплеровского сигнала с частотой было обнаружено

и в других гелиогеофизических условиях [Бадин, 2016, 2017].

Отметим, что количественная оценка минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения 4.9 ± 0.2 мГц в данном случае не содержит статистически достоверной оценки погрешности, поскольку представляет собой среднее значение из восьми величин. Приведенная вариация минимальной частоты поглощения всего лишь учитывает разброс значений между лучами радара, и эта вариация выбрана с таким расчетом, чтобы охватить все значения, полученные для всех лучей радара. Тем не менее, хорошее согласие с магнитометрическими оценками минимальной резонансной частоты силовых линий позволяет надеяться на достаточную достоверность доплеровских радарных измерений этой величины. Можно также надеяться на то, что доплеровские радарные наблюдения в сочетании с имеющимися моделями геомагнитного поля и плотности плазмы в магнитосфере позволят уточнить наши представления об изменчивости этих величин. Во всяком случае, доступная для наземного мониторинга экспериментальная оценка минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения обеспечивает дополнительный диагностический параметр для изучения внешней магнитосферы.

Автор благодарит М.Г. Деминова и В.А. Пилипенко за полезные обсуждения.

Работа радаров STARE обеспечивалась Институтом аэронавтики им. Макса Планка (Германия) и Финским метеорологическим институтом (Финляндия) в кооперации с университетом Тронхейма (Норвегия).

Данная работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований проект № 17-05-00427.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадин В.И. Возбуждение и поглощение УНЧ-колебаний по доплеровским радарным наблюдениям в высоких широтах // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 56. № 1. С. 93–101. 2016. doi 10.7868/S0016794016010028
- Бадин В.И. Резонансное УНЧ-поглощение в условиях магнитной бури // Солнечно-земная физика. Т. 3. № 1. С. 79–87. 2017. doi 10.12737/21428
- Гульельми А.В., Потанов А.С. Об особенностях поля МГД-волн в неоднородной плазме // Исследования по геомагнетизму, аэронавтике и физике Солнца. Вып. 70. С. 149–157. 1984.
- Леонович А.С., Мазур В.А. Собственные сверхнизкочастотные магнитозвуковые колебания ближнего плазменного слоя // Космич. исслед. Т. 46. № 4. С. 336–343. 2008.
- Челпанов М.А., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Бернгардт О.И., Магер О.В. Наблюдения дрейфово-компрессионных волн с помощью среднеширотного дека-

- метрового когерентного радара // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 2. С. 46–56. 2016. doi 10.12737/16999
- *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.
- *Allan W., Poulter E.M., Nielsen E.* STARE observations of a Pc5 pulsation with large azimuthal wave number // *J. Geophys. Res.* V. 87. № A8. P. 6163–6172. 1982.
- *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.
- *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.* MHD field line resonances and global modes in three-dimensional magnetic fields // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A1. 1002. 2003. doi 10.1029/2002JA009470
- *Cheng C.Z., Zaharia S.* Field line resonances in quiet and disturbed time three-dimensional magnetospheres // *J. Geophys. Res.* V. 108. № A1. 1001. 2003. doi 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.
- *Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Raistrick R., McNeil W.J.* Statistical and functional representations of the pattern of auroral energy flux, number flux, and conductivity // *J. Geophys. Res.* V. 92. № A11. P. 12275–12294. 1987.
- *James M.K., Yeoman T.K., Mager P.N., Klimushkin D.Yu.* Multiradar observations of substorm-driven ULF waves // *J. Geophys. Res. Space Phys.* V. 121. P. 5213–5232. 2016. doi 10.1002/2015JA022102
- *Kivelson M.G., Southwood D.J.* Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances // *J. Geophys. Res.* V. 91. № A4. P. 4345–4351. 1986.
- *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.
- *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.
- *Newton R.S., Southwood D.J., Hughes W.J.* Damping of geomagnetic pulsations by the ionosphere // *Planet. Space Sci.* V. 26. № 3. P. 201–209. 1978.
- *Pilipenko V., Belakhovsky V., Kozlovsky A., Fedorov E., Kauristie K.* Determination of the wave mode contribution into the ULF pulsations from combined radar and magnetometer data: Method of apparent impedance // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 77. № 1. P. 85–95. 2012.
- *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. doi 10.1029/2011SW000688
- *Walker A.D.M., Greenwald R.A., Stuart W.F., Green C.A.* Stare auroral radar observations of Pc5 geomagnetic pulsations // *J. Geophys. Res.* V. 84. № A7. P. 3373–3388. 1979.
- *Wallis D.D., Budzinski E.E.* Empirical models of height integrated conductivities // *J. Geophys. Res.* V. 86. № A1. P. 125–137. 1981.
- *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.