

## РЕЗОНАНСНОЕ УНЧ-ПОГЛОЩЕНИЕ В УСЛОВИЯХ МАГНИТНОЙ БУРИ

## RESONANT ULF ABSORPTION IN STORM TIME CONDITIONS

В.И. Бадин

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,  
Москва, Россия, badin@izmiran.ru*

V.I. Badin

*Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio  
Wave Propagation RAS,  
Moscow, Russia, badin@izmiran.ru*

**Аннотация.** Работа посвящена радарным ультранизкочастотным (УНЧ) наблюдениям в высокоширотной ионосфере. Проведен анализ доплеровских данных норвежского радара STARE в условиях умеренной магнитной бури 31.12.1999–01.01.2000 г. После усреднения доплеровских сигналов вдоль лучей радара определена спектральная мощность сигнала как функция частоты в диапазоне 1–10 мГц для каждого луча. На всех лучах радара обнаружено резкое падение (около 10 дБ) спектральной мощности с ростом частоты. Методом наименьших квадратов проведен вариационный анализ спектральной мощности, в котором падение мощности моделировалось ступенчатым профилем, составленным из средних значений мощности до и после падения. Посредством вариационного анализа для каждого луча определена частота, на которой произошло падение спектральной мощности. Усредненное по всем лучам значение такой частоты составило  $4.8 \pm 0.5$  мГц. Полученные результаты интерпретируются как эффект резонансного поглощения УНЧ-волн на собственных частотах магнитных силовых линий по мере распространения волн от магнитопаузы в глубину магнитосферы.

**Ключевые слова:** УНЧ-волны, электрические поля, высокоширотная ионосфера.

**Abstract.** The work deals with ULF radar observations of the high-latitude ionosphere. Doppler data from the Norwegian STARE instrument are analyzed for the moderate magnetic storm observed on December 31, 1999–January 01, 2000. Upon averaging the Doppler signals along radar beams, the spectral power of signals is determined for each beam as a function of frequency ranging from 1 to 10 mHz. Sharp drops (about 10 dB) of spectral powers with frequency are found for all radar beams. A variational analysis of spectral powers is carried out by least squares, with power drops being modeled by stepwise profiles constructed of mean spectral powers preceding and succeeding the drops. Using this variational analysis, the frequency of the power drop is determined for each radar beam. Being averaged over all beams, this frequency is  $4.8 \pm 0.5$  mHz. The results obtained are interpreted as resonant absorption of ultra-low-frequency (ULF) waves occurring on eigenfrequencies of magnetic field lines over wave propagation from the magnetopause deep into the magnetosphere.

**Keywords:** ULF waves, electric fields, high-latitude ionosphere.

## ВВЕДЕНИЕ

Происхождение ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний магнитных и электрических полей часто связывают с возбуждением магнитогидродинамических (МГД) резонансов в околоземной плазме, замороженной в геомагнитное поле. В работах [Chen, Hasegawa, 1974; Southwood, 1974] дан теоретический анализ возбуждения в магнитосфере резонансных УНЧ-колебаний магнитных силовых линий поверхностными МГД-волнами. Резонансные частоты таких колебаний неоднократно рассчитывались численными методами как для дипольной [Lee, Lysak, 1989] так и недипольной [Cheng, Zaharia, 2003] моделей геомагнитного поля. Численные расчеты установили типичные значения минимальных резонансных частот 3–5 мГц (на дневной стороне магнитосферы) для спокойных геомагнитных условий. Существенное ограничение таких исследований состояло в приближении бесконечно большой ионосферной проводимости. Данное приближение ограничило резонансы магнитных силовых линий только

собственными колебаниями так называемой классической полуволновой моды, т. е. стоячими волнами, для которых вдоль силовой линии между сопряженными ионосферами укладывается целое число полуволн. В этом случае резонансные колебания магнитной силовой линии аналогичны акустическим колебаниям струны, концы которой закреплены в E-слое сопряженных ионосфер [Нишида, 1980].

Учет конечной проводимости ионосферы прежде всего обнаружил значительный декремент затухания основной гармоники полуволновой моды для достаточно низкой ионосферной проводимости [Newton et al., 1978]. Кроме того, конечная проводимость ионосферы добавила к резонансам магнитных силовых линий четвертьволновые колебания, для которых между сопряженными ионосферами укладывается нечетное число четвертей длины волны [Allan, Knox, 1979]. Такие колебания аналогичны акустическим колебаниям трубы, один конец которой закреплен, а другой остается свободным. В отличие от симметричных относительно экваториальной плос-

кости полуволновых колебаний четвертьволновые колебания асимметричны и для их возбуждения необходима асимметричная конфигурация проводимости, например  $\Sigma_{PN} < \Sigma_W < \Sigma_{PS}$ , где  $\Sigma_W$  — волновая проводимость магнитосферы,  $\Sigma_{PN}$  и  $\Sigma_{PS}$  — интегральные проводимости Педерсена сопряженных ионосфер в Северном и Южном полушариях соответственно [Alperovich, Fedorov, 2007].

Конечная проводимость ионосферы ограничивает добротность магнитосферного МГД-резонатора. В работе [Yumoto et al., 1995] проведен подробный теоретический анализ влияния омической диссипации энергии в ионосфере на добротность магнитосферного резонатора. Для благоприятных дневных условий на средних широтах такие теоретические оценки дают значения добротности  $Q \sim 10\text{--}10^2$ . Однако экспериментальные оценки дают гораздо меньшие значения. Например, в работе [Menk et al., 2000] получена экспериментальная оценка  $Q \approx 2$  для  $L \approx 2$  в дневных условиях. Различия между экспериментальными и теоретическими оценками могут объясняться сильным влиянием на добротность резонатора недиссипативных потерь энергии [Poulter, Allan, 1985]. В высоких широтах, т. е. при  $L \sim 10$  и при низкой ионосферной проводимости в условиях полярной зимы, теоретическая оценка добротности, учитывающая только омическую диссипацию [Yumoto et al., 1995], дает величину  $Q_1 \sim 1$ . В высоких широтах появляются дополнительные недиссипативные потери, обусловленные, например, магнитосферной конвекцией. Действительно, траектории конвекции в общем случае не совпадают с магнитными поверхностями постоянного периода резонанса магнитных силовых линий. В процессе дрейфового движения магнитосферная плазма вместе с продольными токами уходит из области резонанса, что приводит к дополнительным потерям энергии резонатора и снижает добротность. При низкой добротности резонатора амплитуда собственных колебаний не будет превышать амплитуду фоновых волн и это обстоятельство затрудняет наблюдение резонансных УНЧ-колебаний в высоких широтах.

Высокие амплитуды колебаний на частотах 2.7, 3.5 и 3.9 мГц, обнаруженные в высокоширотных доплеровских радарных данных, в работе [Walker et al., 1979] интерпретированы как наблюдения резонансов магнитных силовых линий в предположении, что стоячие альфвеновские волны наблюдаемых резонансов имеют в ионосфере пучность поперечного электрического поля. Однако для согласия радарных измерений электрического поля с магнитными наблюдениями авторам пришлось предположить, что интегральная проводимость ионосферы в месте наблюдения составляла около 10 См. Дальнейшие исследования [Alperovich, Fedorov, 2007] показали, что эти два предположения несовместимы, а именно, при ионосферной проводимости 10 См стоячая альфвеновская волна резонанса магнитных силовых линий имеет в ионосфере узел электрического поля. Отметим, что измерения проводились в условиях полярной зимы, когда зенитный угол Солнца был около  $90^\circ$ . Значения ионосферной проводимости по модели IRI2012 для этих условий составляют 1–2 См

[<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ionocond>]. Столь значительное расхождение между модельным и необходимым значениями ионосферной проводимости указывает на интенсивные высыпания энергичных частиц. Данные OMNI поддерживают такой вывод, при этом отмечается присутствие в магнитосфере энергичных протонов в широком диапазоне энергий. Интенсивные высыпания частиц обычно локализованы в пространстве, что предполагает возбуждение волн с высокими азимутальными числами, а это не характерно для тороидальных колебаний. В том же диапазоне частот [Allan et al., 1982] наблюдались волны с высокими азимутальными числами, возбуждаемые энергичными магнитосферными протонами посредством, предположительно, баунс-дрейфовой неустойчивости. Возбуждение энергичными протонами УНЧ-волн, например дрейфово-компрессионных, неоднократно наблюдали с помощью радаров SuperDARN. Выделим недавние наблюдения, выполненные отечественным звеном этого проекта [Mager et al., 2015; Chelpanov et al., 2016]. Отметим, что авторы работы [James et al., 2016] наблюдали с помощью нескольких радаров различные частоты в одном событии на одной и той же геомагнитной широте, а в работе [Bland, McDonald, 2016] наблюдались частоты этого диапазона в полярной шапке, что несовместимо с представлениями о резонансах магнитных силовых линий. Наконец, в работе [Бадин, 2016] посредством узкополосной фильтрации в доплеровских данных того же частотного диапазона обнаружены возбуждения, геометрически не совместимые с резонансами магнитных силовых линий.

Авторы работы [Walker et al., 1979] констатировали, что оценки плотности плазмы внешней магнитосферы, выполненные по найденным ими частотам, оказались завышенными и это предполагает, что частоты резонансов магнитных силовых линий должны были быть выше найденных. Отметим, что оценки резонансных частот, выполненные по магнитным наблюдениям, дают в целом более высокие значения частоты, чем оценки по доплеровским радарным данным. Например, в работе [Anderson et al., 1989] по спутниковым магнитным наблюдениям получены значения частот тороидальных стоячих волн  $f_{res} \geq 5$  мГц. Расхождения между различными оценками резонансных частот делают задачу идентификации собственных колебаний магнитных силовых линий особенно актуальной. Для решения этой задачи разрабатывают специальные методики, например [Pilipenko et al., 2012], и обычно используют данные нескольких измерительных инструментов [Белаховский и др., 2015]. Антарктические магнитные УНЧ-наблюдения вблизи геомагнитного полюса позволяют оценить наименьшую частоту резонанса магнитных силовых линий, т. е. собственную частоту наиболее длинной силовой линии на дневной стороне магнитосферы. Для этого изучают суточный ход остаточной спектральной мощности после вычитания средней, т. е. фоновой спектральной мощности УНЧ-колебаний. В полученном суточном ходе находят явные ограничения спектральной мощности снизу на частоту [Lanzerotti et

al., 1999] или сверху на период [Urban et al., 2011] колебаний. Наиболее убедительные ограничения остаточной спектральной мощности обнаружены в утреннем секторе MLT. Найденная наименьшая резонансная частота около 5 мГц интерпретируется как частота стоячей альфвеновской волны на последней замкнутой магнитосферной силовой линии. Отметим, что необходимость вычитания фоновой спектральной мощности и анализа остаточной мощности косвенно свидетельствует в пользу того, что добротность магнитосферного МГД-резонатора в высоких широтах достаточно низкая.

Детальное теоретическое исследование процесса возбуждения резонансных колебаний магнитных силовых линий в МГД-теории показало, что для этого явления характерно прежде всего поглощение энергии внешней волны, возбуждающей резонанс [Гульельми, Потапов, 1984; Kivelson, Southwood, 1986]. Такое резонансное поглощение происходит при любой сколь угодно малой диссипативности среды. При низкой добротности резонатора амплитуда собственных колебаний не будет превышать амплитуду фоновых УНЧ-волн. В таких условиях наблюдение резонансного поглощения фоновых УНЧ-колебаний может оказаться более доступным средством изучения резонансных явлений в магнитосфере. Выявление резонансного УНЧ-поглощения по доплеровским радарным наблюдениям в условиях магнитной бури является основной целью данной работы.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для экспериментальной оценки резонансного поглощения УНЧ-колебаний в магнитосферном МГД-резонаторе использовались доплеровские измерения норвежского ионосферного радара STARE [Greenwald et al., 1978]. По данным OMNI выбран период завершения главной фазы и начала фазы восстановления умеренной магнитной бури ( $K_p \approx 5$ ,  $Dst \approx -40$  нТл), когда радар находился в утреннем секторе MLT. Такой выбор данных позволяет изучать резонансное поглощение на фланге магнитосферы, избегая магнитных силовых линий, уходящих далеко в хвост на ночной стороне.

Гелиогеофизическая характеристика магнитной бури представлена на рис. 1, где приведены  $B_z$ -составляющая межпланетного магнитного поля (ММП), а также геофизические индексы  $K_p$ ,  $Dst$  и  $AE$  как функции мирового времени UT. Мировое время на рисунке отсчитывается последовательно от 0 ч 31.12.1999 г. и включает часть следующего дня 01.01.2000 г. Временной ход индексов  $AE$  и  $Dst$  показывает последовательные впрыскивания энергичной плазмы и нарастание интенсивности кольцевого тока магнитосферы. Кольцевой ток достигает наибольшего развития к полуночи, т. е. к началу двухтысячного года. Анализ доплеровских радарных измерений проведен для периода наибольшего развития кольцевого тока с таким расчетом, чтобы наблюдаемая ионосфера находилась на дневной стороне магнитосферы. Этим условиям удовле-

творяет период с 28 по 32 часы бури (04:00–08:00 UT), которому соответствуют значения  $Dst$  около  $-40$  нТл и преимущественно отрицательные значения  $B_z$  ММП.

## РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Обработка доплеровских измерений включает усреднение данных вдоль каждого луча радара, вычисление дискретного преобразования Фурье (ДПФ) усредненных данных и последующий вариационный анализ полученной спектральной мощности. На рис. 2 показан результат вычисления ДПФ для третьего из восьми имеющихся лучей радара STARE. Приведена спектральная мощность в децибелах (серая кривая) как функция частоты УНЧ-колебаний в миллигерцах. Отчетливо видно скачкообразное понижение спектральной мощности в середине частотного диапазона вблизи 5 мГц. Пунктирные прямые показывают средние значения спектральной мощности до и после скачкообразного падения последней. Штриховыми прямыми показаны стандартные отклонения. Аналогичные результаты получены и для других лучей радара. Возможное физическое объяснение ступенчатого понижения спектральной УНЧ-мощности, зависящей от частоты, состоит в эффекте резонансного поглощения фоновых УНЧ-колебаний магнитосферным МГД-резонатором. Эффект резонансного поглощения МГД-волн впервые изучался теоретически [Гульельми, Потапов, 1984]. Резонансное поглощение, наблюдаемое в доплеровских измерениях скорости поперечного дрейфа ионосферных электронов, означает преобразование энергии УНЧ-колебаний поперечного электрического поля в энергию продольных токов резонансов магнитных силовых линий. Данные резонансы представляют собой стоячие альфвеновские волны, частота которых определяется прежде всего длиной магнитной силовой линии. На дневной стороне магнитосферы длина магнитной силовой линии ограничена пространственным положением магнитопаузы. Этим обусловлено существование минимальной частоты резонансного поглощения.

Визуальный контроль спектральной мощности УНЧ-колебаний скорости поперечного дрейфа электронов E-слоя ионосферы оказался удобным качественным методом наблюдения резонансного поглощения. Для количественной оценки минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения использован вариационный анализ методом наименьших квадратов. Эффект резонансного поглощения в континууме частот моделируется ступенчатым падением спектральной мощности на минимальной частоте резонансного поглощения. При этом ступеньки мощности представляют собой средние арифметические значения спектральной мощности на частотах ниже и выше минимальной частоты резонансного поглощения соответственно. Далее решается вариационная задача отыскания абсолютного минимума (в исследуемом частотном диапазоне) суммы квадратов разностей между спектральной мощностью на каждой частоте диапазона и средним значением спектральной мощности в интервалах

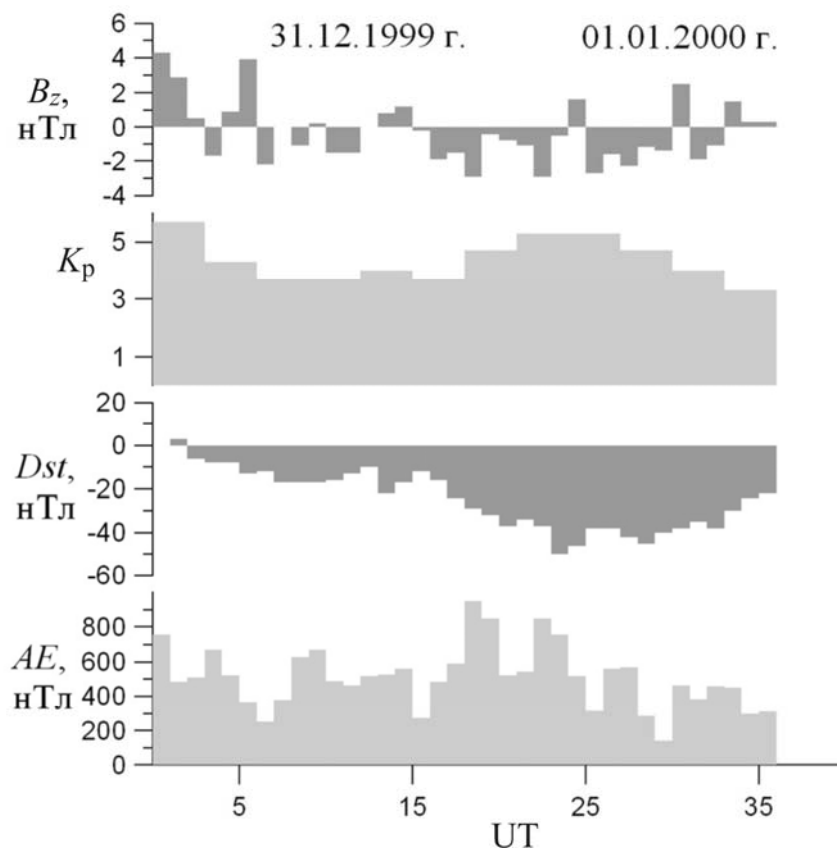


Рис. 1. Характеристика магнитной бури. Сверху вниз показаны  $B_z$ -составляющая межпланетного магнитного поля и геофизические индексы  $K_p$ ,  $Dst$  и  $AE$  как функции UT

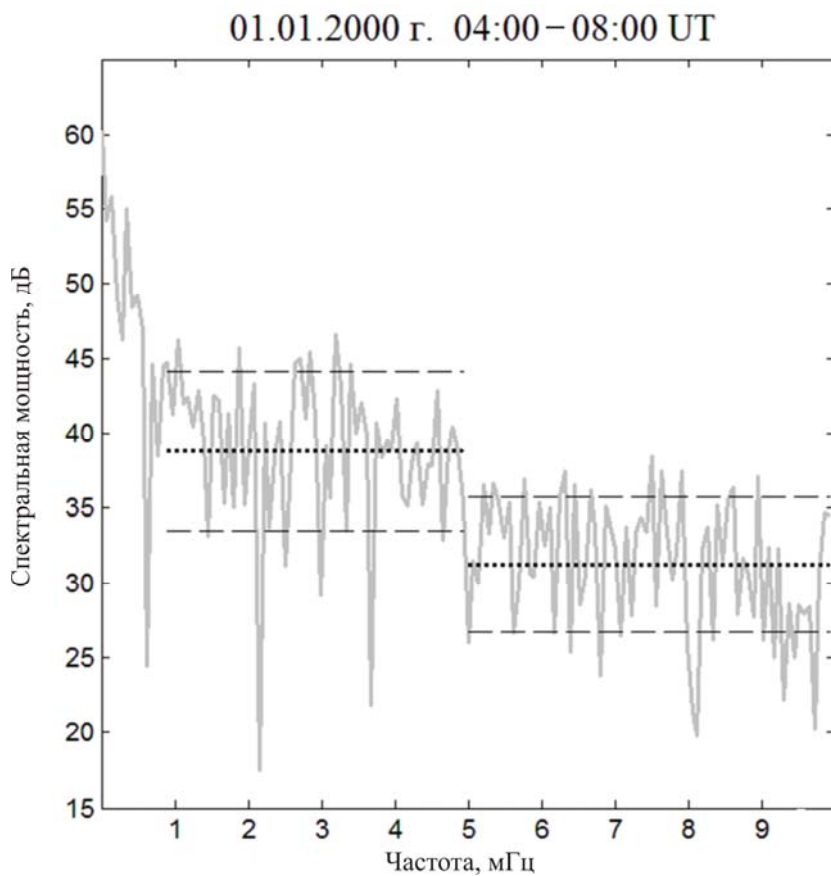


Рис. 2. Спектральная мощность доплеровского сигнала третьего луча радара STARE (серая кривая) как функция частоты в диапазоне 1–10 мГц. Пунктирные прямые показывают средние значения спектральной мощности в своих частотных интервалах. Штриховыми линиями показаны стандартные отклонения

частот ниже и выше минимальной частоты резонансного поглощения соответственно. Решение такой вариационной задачи наилучшим образом вписывает ступенчатую модель резонансного поглощения в спектральную мощность ДПФ, найденную по доплеровским радарным данным. В результате мы получаем количественную экспериментальную оценку минимальной частоты наблюдаемого резонансного УНЧ-поглощения.

Важно подчеркнуть, что спектральная мощность ДПФ содержит значительную случайную составляющую, которая возникает в результате вычисления фурье-преобразования на конечном интервале времени наблюдений. По этой причине индивидуальные значения спектральной мощности большого интереса не представляют. Значимыми оказываются только ее усредненные или сглаженные значения. Обычно сглаживание спектральной мощности осуществляется с помощью спектральных окон. Однако в данном случае применение спектрального окна нежелательно, потому что такое окно сгладит также и падение спектральной мощности, превратив его из ступенчатого в пологое. По этой причине в качестве сглаженных значений используются средние, которые обеспечивают наиболее грубое сглаживание, но сохраняют ступенчатый характер падения спектральной мощности. Отметим также, что отыскание минимальной частоты резонансного поглощения по своему физическому смыслу аналогично поиску ограничения снизу на частоту в магнитных наблюдениях резонансов «последней замкнутой силовой линии» [Lanzerotti et al., 1999].

Совокупные результаты вариационного анализа для всех лучей радара представлены на рис. 3. Серые кривые показывают спектральную мощность УНЧ-колебаний, вычисленную посредством ДПФ доплеровских наблюдений для каждого радарного луча. Пунктирные прямые соответствуют средним арифметическим значениям спектральной мощности для частот соответственно ниже и выше минимальной частоты резонансного поглощения. Значение минимальной частоты резонансного поглощения выбирается таким образом, чтобы сумма квадратов расстояний (по вертикали) от серой кривой до пунктирной ступеньки была минимальной. На рис. 3 в направлении снизу вверх полярные лучи радара сменяются экваториальными. Для удобства представления результатов к каждой вышележащей кривой прибавлены 40 дБ относительно нижележащей кривой. Усредненное по всем радарным лучам значение минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения для данного события составляет  $4.8 \pm 0.5$  мГц. В условиях магнитной бури относительная погрешность такой оценки (более 10 %) оказалась выше, чем погрешность аналогичной оценки в слабозмущенных условиях [Бадин, 2016].

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученное здесь значение минимальной частоты резонансного УНЧ-поглощения не противоречит известным численным расчетам резонансных МГД-частот в магнитосфере [Lee, Lysak, 1989; Cheng, Zaharia, 2003], которые учитывали собствен-

ные колебания только классической полуволновой моды. Частота 5 мГц согласуется также с экспериментальными магнитометрическими оценками наименьшей резонансной частоты магнитных силовых линий [Anderson et al., 1989; Lanzerotti et al., 1999; Urban et al., 2011]. Это позволяет предполагать, что четвертьволновые колебания не возбуждались из-за достаточно высокой ионосферной проводимости, несмотря на зимние условия в полярной ионосфере Северного полушария. Действительно, известные модели ионосферной проводимости, обобщающие экспериментальные наблюдения в высоких широтах [Wallis, Budzinski, 1981; Hardy et al., 1987], показывают, что только за счет высыпания энергичных электронов интегральная проводимость Педерсена в авроральной ионосфере (исключая полярную шапку) превышает 1 См даже в слабозмущенных условиях  $K_p=2$ . В условиях магнитной бури ионосферная проводимость еще выше. Что касается волновой проводимости магнитосферы, то в сименсах она выражается простой формулой  $\Sigma_w=10/(4\pi V_A)$ , где  $V_A$  — альфвеновская скорость в тысячах километров в секунду. Согласно имеющимся представлениям об альфвеновской скорости в магнитосфере, под магнитопаузой  $V_A > 1000$  км/с и, следовательно, волновая проводимость ниже 1 См. В этом случае интегральная проводимость Педерсена в обеих сопряженных ионосферах превышает волновую проводимость магнитосферы, что исключает возбуждение четвертьволновых колебаний.

Разумеется, точные значения альфвеновской скорости и проводимости ионосферы в анализируемом событии нам не известны, а условие возбуждения четвертьволновых колебаний получено в упрощенной модели магнитосферы [Alpegovich, Fedotov, 2007]. Тем не менее, можно полагать возбуждение четвертьволновых колебаний маловероятным. Это, в свою очередь, приводит к значимым дальнейшим выводам. Как известно, в классических полуволновых собственных колебаниях магнитной силовой линии узлы электрического поля стоячей альфвеновской волны находятся в слое E ионосферы [Нишида, 1980]. По этой причине при доплеровских радарных измерениях электрического поля в E-слое ионосферы наблюдают в первую очередь фоновые, т. е. нерезонансные колебания, что позволяет фиксировать резкое падение спектральной УНЧ-мощности, как только частота колебаний попадает в резонансный континуум. Этому способствует также достаточно низкое значение добротности магнитосферного МГД-резонатора. С другой стороны, значительное (около 10 дБ) понижение спектральной мощности доплеровского сигнала означает, что для высокоширотных доплеровских радарных измерений в E-слое ионосферы резонанс магнитных силовых линий выполняет функцию режекторного фильтра, ослабляя полезный сигнал на резонансных частотах.

Отметим, что полученное резкое понижение спектральной мощности с ростом частоты сигнала не удается объяснить эффектами распространения МГД-волн в магнитосфере. Согласно имеющимся представлениям, наблюдаемый УНЧ-фон формируется в результате

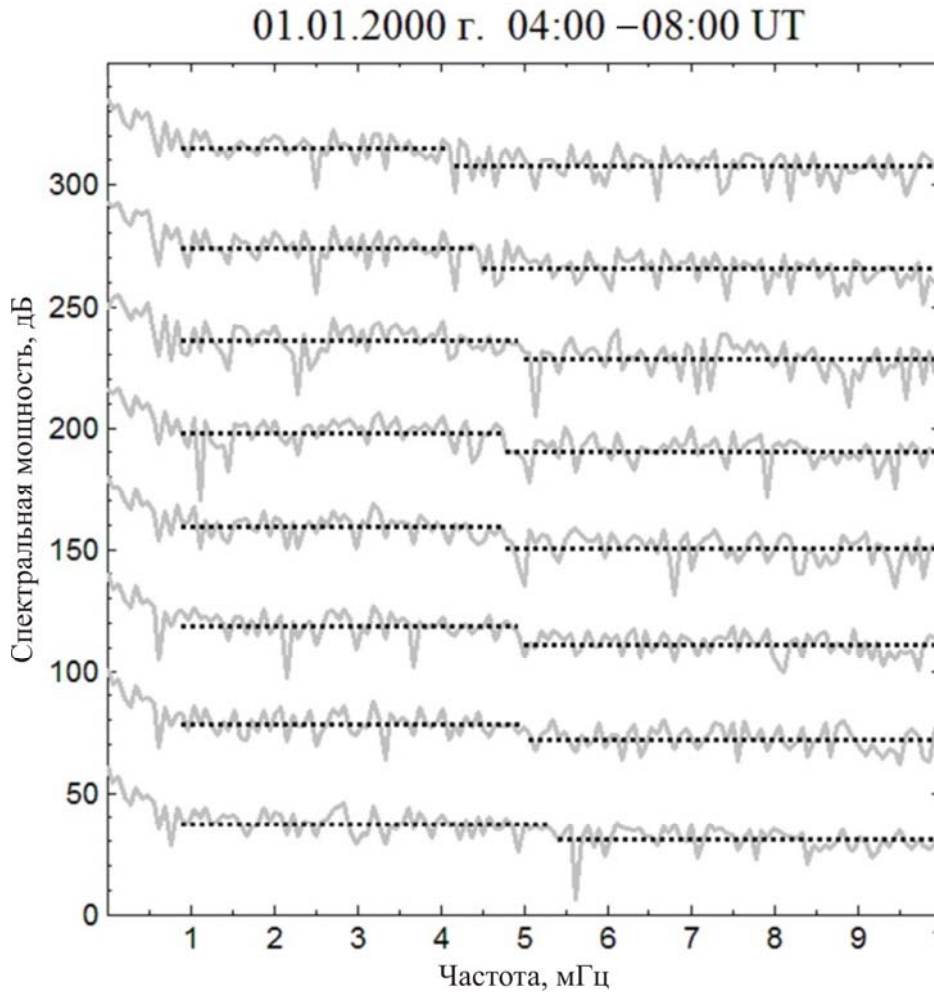


Рис. 3. Совокупные результаты вариационного анализа спектральной мощности для всех лучей радара. Серыми кривыми показана спектральная мощность. Пунктирные прямые показывают для каждого луча средние значения спектральной мощности на частотах ниже и выше минимальной частоты резонансного поглощения. Снизу вверх полярные лучи радара сменяются экваториальными. Для удобства представления результатов к каждой вышележащей кривой прибавлены 40 дБ относительно нижележащей кривой

распространения магнитозвуковых волн от магнитопauses в глубину магнитосферы. При этом волны более высоких частот проникают глубже в магнитосферу, в то время как низкочастотные волны отражаются, по крайней мере, в приближении геометрической оптики [Леонович, Мазур, 2008]. Следовательно, эффекты распространения МГД-волн проявились бы в противоположной ориентации ступеньки спектральной мощности и в повышении частоты, на которой наблюдается такая ступенька, при переходе от полярных лучей радара к экваториальным. В отличие от отражения волн резонансное поглощение происходит в континууме от минимальной частоты и выше, причем силовые линии в глубине магнитосферы поглощают на более высоких частотах. Поэтому в среднем наблюдается понижение спектральной мощности сигнала с ростом частоты.

По мере распространения МГД-волны в глубину магнитосферы происходит омическая диссипация энергии волны. Омическая диссипация в ионосфере пропорциональна  $\Sigma_p |E|^2$ , где  $E$  — амплитуда поперечного электрического поля на данной частоте, а  $\Sigma_p$  — интегральная ионосферная проводимость Педерсена, которая не зависит от частоты. При доплеровских

радарных наблюдениях измеряется проекция скорости дрейфа электронов на лучи радара. С точностью до постоянного множителя радар измеряет составляющую электрического поля, перпендикулярную геомагнитному полю и лучу радара. В свою очередь, направления лучей радара охватывают угол около  $30^\circ$ . Если исключить маловероятный случай линейной поляризации наблюдаемых УНЧ-волн вдоль каждого луча радара, можно считать омические потери волны на каждой частоте пропорциональными спектральной мощности доплеровского сигнала на этой частоте. Такие омические потери энергии волн не объясняют наблюдаемого резкого понижения спектральной мощности доплеровского сигнала с частотой, во всяком случае, экспериментальные данные не выявляют повышенной омической диссипации высокочастотной мощности по сравнению с низкочастотной.

На основе имеющихся представлений о формировании наблюдаемого фона УНЧ-колебаний магнитозвуковыми волнами, приходящими от магнитопauses в глубину магнитосферы, учитывая хорошее согласие найденной минимальной частоты резонансного поглощения с частотами стоячих альфве-

новских волн на последней замкнутой магнитосферной силовой линии [Lanzerotti et al., 1999; Urban et al., 2011] и принимая во внимание тот факт, что проведенный анализ данных не выявил повышения минимальной частоты резонансного поглощения при переходе от полярных лучей радара к экваториальным, можно предполагать, что найденная минимальная резонансная частота соответствует наиболее длинным магнитным силовым линиям, которые находятся вблизи магнитопаузы на дневной стороне магнитосферы. Однако наличие внутримангнитосферных УНЧ-источников, например связанных с энергичными частицами, может поставить под сомнение такие представления, и вопрос о применимости и общности сделанного предположения остается в значительной мере открытым. Тем не менее, ступенчатое падение спектральной мощности с частотой, скорее всего, имеет резонансное происхождение, и такой эффект достаточно сложно объяснить каким-либо другим образом. Выявление резонансного поглощения фоновых УНЧ-колебаний по доплеровским измерениям позволяет изучать резонансные явления по данным одного радара. Использование имеющихся моделей геомагнитного поля и распределения плотности плазмы вдоль магнитных силовых линий, в свою очередь, позволит уточнять эти величины по экспериментальным оценкам резонансных частот.

Известные спутниковые измерения [Roelof, Sibeck, 1993] показывают, что при прочих равных условиях поворот ММП с северного направления на южное приводит к тому, что магнитопауза на флангах магнитосферы удаляется от Земли и это должно приводить к уменьшению минимальной резонансной частоты на флангах магнитосферы. Полученная в данной работе количественная оценка минимальной частоты резонансного поглощения в условиях магнитной бури оказалась достаточно высокой (около 5 мГц), в то время как полученная ранее оценка [Бадин, 2016] такой частоты в слабозмущенных условиях при близких значениях динамического давления солнечного ветра и южной составляющей ММП, а также при слабой *Dst*-вариации была существенно ниже (2.3 мГц). Для объяснения столь значительной разницы между двумя частотами резонансного поглощения, найденными при южном ММП, можно предполагать различные режимы пересоединения магнитных силовых линий в условиях магнитной бури и вне бури. Такое предположение не противоречит представлениям о мгновенном и отсроченном воздействии солнечного ветра на магнитосферу Земли [Tsyganenko, 1995]. Более простое объяснение состоит в возможном влиянии активности Солнца. Несмотря на то, что солнечная активность текущего дня для низкой резонансной частоты была несколько выше, чем для высокой, частота 2.3 мГц получена для эпохи низкой солнечной активности 2004 г., когда сглаженные среднемесячные значения числа солнечных пятен были вдвое ниже, чем в 2000 г. Если при низкой активности Солнца магнитные бури происходят сравнительно редко, то при высокой активности 2000 г. интервал времени между последовательными бурями мог

быть существенно короче, чем характерное время заполнения магнитных трубок тепловой плазмой [Кринберг, Тащилин, 1984]. Вследствие воздействия одной или многих последовательных магнитных бурь плотность плазмы во внешней магнитосфере в 2000 г. могла быть в среднем существенно ниже, чем в 2004 г. Более высокая плотность плазмы при низкой активности Солнца могла обеспечить низкую альфвеновскую скорость и соответственно низкую резонансную частоту. Необходимы дальнейшие исследования, для того чтобы уточнить характер зависимости резонансных частот от солнечной и магнитной активности.

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

Работа радаров STARE обеспечивалась совместно 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, код проекта № 17-05-00427.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадин В.И. Возбуждение и поглощение УНЧ-колебаний по доплеровским радарным наблюдениям в высоких широтах // Геомагнетизм и аэронавтика. 2016. Т. 56, № 1. С. 93–101.
- Белаховский В.Б., Козловский А.Е., Пилипенко В.А. Определение широтного профиля резонансной частоты Pc5 пульсаций по данным радара EISCAT // Вестник Кольского научного центра РАН. 2015. Т. 22, № 3. С. 64–72.
- Гульельми А.В., Потапов А.С. Об особенностях поля МГД-волны в неоднородной плазме // Иссл. по геомагнетизму, аэронавтики и физике Солнца. 1984. Вып. 70. С. 149–157.
- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 189 с.
- Леонович А.С., Мазур В.А. Собственные сверхнизкочастотные магнитозвуковые колебания ближнего плазменного слоя // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 4. С. 336–343.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980. 299 с.
- Allan W., Knox F.B. A dipole field model for axisymmetric Alfvén waves with finite ionosphere conductivities // Planetary Space Sci. 1979. V. 27, N. 1. P. 79–85.
- Allan W., Poulter E.M., Nielsen E. STARE observations of a Pc5 pulsation with large azimuthal wave number // J. Geophys. Res. 1982. V. 87, N. A8. P. 6163–6172.
- Alperovich L.S., Fedorov E.N. Hydromagnetic waves in the magnetosphere and the ionosphere. New York: Springer, 2007. 421 p.
- 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. 1989. V. 94, N A10. P. 13425–13445.
- Bland E.C., McDonald A.J. High spatial resolution radar observations of ultralow frequency waves in the southern polar cap // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 4005–4016. DOI: 10.1002/2015JA022235.
- Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Berggardt O.I., Mager O.V. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 1315–1326. DOI: 10.1002/2015JA022155.

Chen L., Hasegawa A. A theory of long-period magnetic pulsations: 1. Steady state excitation of field line resonance // *J. Geophys. Res.* 1974. V. 79, N A7. P. 1024–1032.

Cheng C.Z., Zaharia S. Field line resonances in quiet and disturbed time three-dimensional magnetospheres // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N A1. 1001. DOI:10.1029/2002JA009471.

Greenwald R.A., Weiss W., Nielsen E., Thomson N.R. STARE: A new radar auroral backscatter experiment in northern Scandinavia // *Radio Sci.* 1978. V. 13, N 6. P. 1021–1039.

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.* 1987. V. 92, N A11. P. 12275–12294.

James M.K., Yeoman T.K., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Multiradar observations of substorm-driven ULF waves // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. V. 121. P. 5213–5232. DOI:10.1002/2015JA022102.

Kivelson M.G., Southwood D.J. Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances // *J. Geophys. Res.* 1986. V. 91, N A4. P. 4345–4351.

Lanzerotti L.J., Shono A., Fukunishi H., MacLennan C.G. Long-period hydromagnetic waves at very high geomagnetic latitudes // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N A12. P. 28423–28435.

Lee D.-H., Lysak R.L. Magnetospheric ULF wave coupling in the dipole model: Impulsive excitation // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94, N A12. P. 17097–17103.

Mager P.N., Bergardt 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.* 2015. V. 130–131. P. 112–126.

Menk F.W., Waters C.L., Fraser B.J. Field line resonances and waveguide modes at low latitudes. 1. Observations // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A4. P. 7747–7761.

Newton R.S., Southwood D.J., Hughes W.J. Damping of geomagnetic pulsations by the ionosphere // *Planet. Space Sci.* 1978. V. 26, N 3. P. 201–209.

Poulter E.M., Allan W. Transient ULF pulsation decay rates observed by ground based magnetometers: The contribution of spatial integration // *Planet. Space Sci.* 1985. V. 33, N 6. P. 607–616.

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. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2012. V. 77, N 1. P. 85–95.

Roelof E.C., Sibeck D.G. Magnetopause shape as a bivariate function of interplanetary magnetic field  $B_z$  and solar wind dynamic pressure // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98, N A12. P. 21421–21450.

Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1974. V. 22, N 3. P. 483–491.

Tsyganenko N.A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100, N A4. P. 5599–5612.

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.* 2011. V. 9. S11001. 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.* 1979. V. 84, N A7. P. 3373–3388.

Wallis D.D., Budzinski E.E. Empirical models of height integrated conductivities // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 86, N A1. P. 125–137.

Yumoto K., Pilipenko V., Fedorov E., Kurneva N., Shiohawa K. The mechanisms of damping of geomagnetic pulsations // *J. Geomagnetism Geoelectricity.* 1995. V. 47, N 1. P. 163–176.

## REFERENCES

Allan W., Knox F.B. A dipole field model for axisymmetric Alfvén waves with finite ionosphere conductivities. *Planet. Space Sci.* 1979, vol. 27, no. 1, pp. 79–85.

Allan W., Poulter E.M., Nielsen E. STARE observations of a Pc5 pulsation with large azimuthal wave number. *J. Geophys. Res.* 1982, vol. 87, no. A8, pp. 6163–6172.

Alperovich L.S., Fedorov E.N. Hydromagnetic waves in the magnetosphere and the ionosphere. New York: Springer, 2007. 421 p.

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.* 1989, vol. 94, no. A10, pp. 13425–13445.

Badin V.I. Excitation and absorption of ULF oscillations from Doppler radar observation at high latitudes. *Geomagnitizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2016, vol. 56, no. 1, pp. 93–101. (In Russian).

Belakhovsky V.B., Kozlovsky A.E., Pilipenko V.A. Determination of the latitudinal profile of resonance frequency of Pc5 pulsations from EISCAT radar data. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Bull. of Kola Scientific Centre RAS] 2015, vol. 22, no. 3, pp. 64–72. (In Russian).

Bland E.C., McDonald A.J. High spatial resolution radar observations of ultralow frequency waves in the southern polar cap. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 4005–4016. DOI: 10.1002/2015JA022235.

Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D. Yu., Bergardt O.I., Mager O.V. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: An Ekaterinburg coherent decameter radar case study. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 1315–1326. DOI: 10.1002/2015JA022155.

Chen L., Hasegawa A. A theory of long-period magnetic pulsations: 1. Steady state excitation of field line resonance. *J. Geophys. Res.* 1974, vol. 79, no. A7, pp. 1024–1032.

Cheng C.Z., Zaharia S. Field line resonances in quiet and disturbed time three-dimensional magnetospheres. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. A1. 1001. DOI: 10.1029/2002JA009471.

Greenwald R.A., Weiss W., Nielsen E., Thomson N.R. STARE: A new radar auroral backscatter experiment in northern Scandinavia. *Radio Sci.* 1978, vol. 13, no. 6, pp. 1021–1039.

Guglielmi A.V., Potapov A.S. On the peculiarity of MHD wave field in inhomogeneous plasma. *Issledovaniya po geomagnitizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1984, iss. 70, pp. 149–157. (In Russian).

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.* 1987, vol. 92, no. A11, pp. 12275–12294.

James M.K., Yeoman T.K., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Multiradar observations of substorm-driven ULF waves. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 5213–5232. DOI: 10.1002/2015JA022102.

Kivelson M.G., Southwood D.J. Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances. *J. Geophys. Res.* 1986, vol. 91, no. A4, pp. 4345–4351.

Krinberg I.A., Tashchilin A.V. *Ionosfera i plazmosfera* [Ionosphere and Plasmasphere]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 189 p. (In Russian).

Lanzerotti L.J., Shono A., Fukunishi H., MacLennan C.G. Long-period hydromagnetic waves at very high geomagnetic latitudes. *J. Geophys. Res.* 1999, vol. 104, no. A12, pp. 28423–28435.



Lee D.-H., Lysak R.L. Magnetospheric ULF wave coupling in the dipole model: impulsive excitation. *J. Geophys. Res.* 1989, vol. 94, no. A12, pp. 17097–17103.

Leonovich A.S., Mazur V.A. Eigen ultralow frequency magnetoacoustic oscillations of near plasma layer. *Kosmicheskie issledovaniya* [Cosmic Research]. 2008, vol. 46, no. 4, pp. 336–343. (In Russian).

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 Super-DARN radar: ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 130–131, pp. 112–126.

Menk F.W., Waters C.L., Fraser B.J. Field line resonances and waveguide modes at low latitudes. 1. Observations. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A4, pp. 7747–7761.

Newton R.S., Southwood D.J., Hughes W.J. Damping of geomagnetic pulsations by the ionosphere. *Planet. Space Sci.* 1978, vol. 26, no. 3, pp. 201–209.

Nishida A. *Geomagnitnyi diagnost magnitosfery* [Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere]. Moscow, Mir Publ., 1980. 299 p. (In Russian).

Poulter E.M., Allan W. Transient ULF pulsation decay rates observed by ground based magnetometers: the contribution of spatial integration. *Planet. Space Sci.* 1985, vol. 33, no. 6, pp. 607–616.

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. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 77, no. 1, pp. 85–95.

Roelof E.C., Sibeck D.G. Magnetopause shape as a bivariate function of interplanetary magnetic field  $B_z$  and solar wind dynamic pressure. *J. Geophys. Res.* 1993, vol. 98, no. A12, pp. 21421–21450.

Southwood D.J. Some features of field line resonances in the magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1974, vol. 22, no. 3, pp. 483–491.

Tsyganenko N.A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause. *J. Geophys. Res.* 1995, vol. 100, no. A4, pp. 5599–5612.

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.* 2011, vol. 9, S11001. 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.* 1979, vol. 84, no. A7, pp. 3373–3388.

Wallis D.D., Budzinski E.E. Empirical models of height integrated conductivities. *J. Geophys. Res.* 1981, vol. 86, no. A1, pp. 125–137.

Yumoto K., Pilipenko V., Fedorov E., Kurneva N., Shiohara K. The mechanisms of damping of geomagnetic pulsations. *J. Geomagnetism Geoelectricity.* 1995, vol. 47, no. 1, pp. 163–176.