
**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ УНЧ-ВОЛН
ПО ДАННЫМ VAN ALLEN PROBE A:
СУЩЕСТВУЮТ ЛИ РАЗДЕЛЬНО ТОРОИДАЛЬНЫЕ
И ПОЛОИДАЛЬНЫЕ ВОЛНЫ В МАГНИТОСФЕРЕ?**

**POLARIZATION DISTRIBUTION OF TRANSVERSE ULF WAVES ACCORDING
TO VAN ALLEN PROBE A DATA: WHETHER TOROIDAL
AND POLOIDAL WAVES EXIST SEPARATELY IN THE MAGNETOSPHERE?**

А.И. Якимчук

*Институт математики и информационных технологий,
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, artur.yakimchuk@yandex.ru
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия*

А.В. Рубцов 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, avrubtsov@iszf.irk.ru*

Д.Ю. Климушкин 

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, klimush@iszf.irk.ru*

A.I. Yakimchuk

*Institute of Mathematics and Information Technologies,
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia artur.yakimchuk@yandex.ru
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia*

A.V. Rubtsov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, avrubtsov@iszf.irk.ru*

D.Yu. Klimushkin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, klimush@iszf.irk.ru*

Аннотация. Ультранизкочастотные (УНЧ) волны играют важную роль в переносе энергии внутри магнитосферы Земли за счет активного взаимодействия с окружающей плазмой. Предыдущие работы предполагали, что эти волны строго делятся по поляризации на тороидальные, когда магнитное поле осциллирует в азимутальном направлении, и полоидальные, когда оно осциллирует в радиальном направлении. Было определено, что первые являются азимутально-крупномасштабными и возбуждаются внешними источниками, а вторые — мелкомасштабными и генерируются внутренними неустойчивостями плазмы. Последние наблюдения показывают, что часто встречаются волны смешанной поляризации, однако природа этого смешения пока не объяснялась. В данной работе мы провели статистическое исследование и показали, что поляризация поперечных волн имеет нормальное распределение, а максимум соответствует колебаниям тороидальной и полоидальной составляющих с одинаковой амплитудой. Пространственные распределения тороидальных и полоидальных волн хотя и различаются заметно, но это различие приводит лишь к небольшому смещению положения максимума распределения. Этот результат показывает, что для сопоставления теории с наблюдениями УНЧ-волн необходимо учитывать процессы изменения поляризации, которые могут повлиять на взаимодействие волн с заряженными частицами магнитосферы.

Ключевые слова: магнитосфера, УНЧ-волны, альфвеновские волны, поляризация.

Abstract. Ultralow-frequency (ULF) waves play an important role in energy transfer within Earth's magnetosphere due to intensive interaction with the surrounding plasma. Previous works have assumed that these waves are strictly divided by polarization into toroidal, when the magnetic field oscillates in the azimuthal direction, and poloidal, when it oscillates in the radial direction. The former are azimuthally large-scale and are excited by external sources, whereas the latter are small-scale and are generated by internal plasma instabilities. Observations show, however, that waves of mixed polarization often occur, and the nature of this mixing has not been explained. In this paper, we carry out a statistical study and show that the polarization of transverse waves has a normal distribution, and the maximum corresponds to oscillations of the toroidal and poloidal components with the same amplitude. At the same time, the spatial distributions of toroidal and poloidal waves are clearly different, but only lead to a small shift in the position of the distribution maximum. This result suggests that in order to compare the theory with ULF wave observations it is necessary to take into account the processes of polarization change, which can affect wave-particle interactions in the magnetosphere.

Keywords: magnetosphere, ULF waves, Alfvén waves, polarization.

ВВЕДЕНИЕ

Альфеновские волны в магнитосфере представляют собой собственные колебания силовых линий магнитного поля Земли. Эти волны попадают в длиннопериодную часть диапазона ультранизких частот (УНЧ), т. е. их длина волны сравнима с размерами Земли и поэтому они играют важную роль в переносе энергии через всю магнитосферу [Гульельми, Троицкая, 1973]. Они могут генерировать параллельные магнитному полю электрические поля, играющие большую роль в ускорении электронов, вызывающих полярные сияния [Kostarev et al., 2021]. Предполагается важная роль УНЧ-волн в квазивязкой передаче энергии и импульса магнитосфере от солнечного ветра [Леонович, Мишин, 1999] и в ускорении частиц полярного ветра [Guglielmi, Lundin, 2001]. Связанные с УНЧ-волнами плазменные неустойчивости могут играть значительную роль в инициации суббурь [Samson et al., 1992; Antonova et al., 2009; Головчанская и др., 2018].

Альфеновские волны в магнитосфере генерируются посредством разнообразных механизмов — как внешних (по отношению к магнитосфере), так и внутренних. Внешние механизмы относятся в основном к волнам, имеющим малое значение азимутального волнового числа ($m \sim 1$). Эти механизмы так или иначе связаны с взаимодействием магнитосферы с солнечным ветром: импульсы динамического давления солнечного ветра, гидромагнитные неустойчивости на границе магнитосферы, непосредственный переход в магнитосферу волн из солнечного ветра [Agaritov, Cheremnykh, 2013]. Азимутально-крупномасштабные волны должны иметь тороидальную поляризацию, когда колебания силовых линий происходят в азимутальном направлении (рис. 1, слева). При этом вектор электрического поля колеблется в радиальном направлении.

Внутримангитосферные механизмы генерации УНЧ-волн относятся к волнам с большими значениями азимутального волнового числа ($m \gg 1$). Эти механизмы включают в себя различные плазменные неустойчивости [Chen, Hasegawa, 1991], переменные токи внутри магнитосферы и/или ионосферы [Магер, Климушкин, 2007]. Для азимутально-мелкомасштабных волн характерны колебания силовых линий в радиальном направлении (см. рис. 1, справа). Вектор электрического поля при этом колеблется в азимутальном направлении. Такие альфеновские волны называются полоидальными. Следует отметить, что полоидальные альфеновские волны должны трансформироваться в тороидальные. Для импульсно-генерированных волн трансформация происходит во времени, т. е. сначала волна имеет полоидальную поляризацию, которая спустя некоторое время сменяется тороидальной [Mann, Wright, 1995; Leonovich, Mazur, 1998]. Для монохроматических волн трансформация происходит в пространстве, т. е. в части своей области локализации волна имеет полоидальную поляризацию, в части — тороидальную, причем происходит постепенное смещение волны из полоидальной области в тороидальную [Leonovich, Mazur, 1993; Klimushkin et al., 1995].

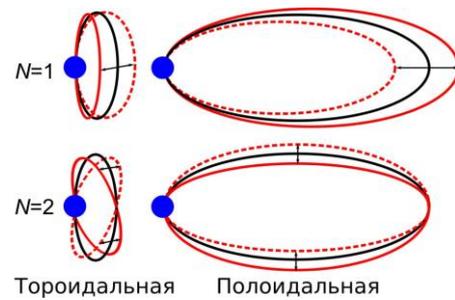


Рис. 1. Характер колебаний силовых линий в тороидальных и полоидальных альфеновских волнах [Климушкин и др., 2021]. Показаны главная (вверху) и вторая (внизу) гармоники

Наличие двух типов волн, различающихся как по механизмам генерации, так и по поляризации, ставит вопрос, насколько отчетливо выражены эти две группы по своим наблюдательным проявлениям: действительно ли существуют отдельно тороидальные и полоидальные волны, или между ними имеется плавный переход. Для изучения этого вопроса требуется задействовать спутниковые данные, поскольку до поверхности Земли волны с $m \gg 1$ не доходят ввиду экранирующего воздействия атмосферы [Hughes, Southwood, 1976]. В данной работе этот вопрос исследуется на основе данных спутника Van Allen Probe A

1. ДАННЫЕ

Мы использовали данные космического аппарата Van Allen Probe A с января 2017 г. по октябрь 2018 г. [Mauk et al., 2013]. За это время спутник совершил один полный обзор магнитосферы. Для анализа использовались только четырехсекундные измерения вектора магнитного поля инструментом Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) [Kletzing et al., 2013]. Орбита спутника проходит вблизи магнитного экватора (магнитная широта $< 20^\circ$), поэтому для описания положения спутника в проекции на экватор мы используем параметр Мак-Илвейна L [McIlwain, 1961] и местное магнитное время (MLT). Van Allen Probe A удаляется от Земли не более чем на $6 R_E$, что позволяет исключить пересечение им магнитопаузы в исследуемом интервале времени. Такая конфигурация орбиты спутника удобна для изучения поперечных УНЧ-волн, которые обычно отождествляются с альфеновскими волнами. Мы будем рассматривать УНЧ-волны на расстояниях $L > 4$, поскольку вблизи перигея орбиты скорость спутника возрастает, что приводит к искажениям в наблюдениях волн УНЧ-диапазона.

Исследование УНЧ-волн в диапазонах Pc4 и Pc5, охватывающих периоды волн от 45 до 600 с, удобно проводить с использованием системы координат, ориентированной по магнитному полю Земли. Направление вдоль силовых линий определяется 10-минутным усреднением данных методом скользящего среднего, что позволяет выделить продольные возмущения магнитного поля b_{\parallel} . Возмущения магнитного поля поперек силовых линий ориентированы радиально от Земли b_r и азимутально на восток b_a . Выбор 10-минутного окна является доста-

точным, поскольку Van Allen Probe A не поднимается выше $L=6.5$, а согласно более ранним наблюдениям и модельным расчетам на таких расстояниях частота альфвеновских волн остается выше 5 МГц (период 200 с) [Takahashi et al., 2002].

Процедура отбора волн для статистического анализа выполнялась через поиск отдельных событий. Предварительно из измерений магнитного поля были выделены возмущения в диапазонах Pc4 и Pc5 с помощью полосового фильтра. Исследуемый временной отрезок был разбит на интервалы по 15 мин с шагом 5 мин, что обеспечивает достаточную точность определения времени начала и окончания наблюдения волны. Для каждой компоненты магнитного поля и каждого 15-минутного интервала с помощью быстрого преобразования Фурье строился частотный спектр, в котором сигнал на частоте отдельного пика считался волной, если ширина пика на его полувысоте была меньше, чем 40 % частоты пика. Если пики были обнаружены в подряд идущих интервалах и их частота отличалась не более чем на 2 МГц, то этот случай считался единым событием. В результате каждая волна характеризуется временем начала и конца ее наблюдения, частотой и средним значением амплитуды в каждой из трех компонент. Амплитуда волны определялась после фильтрации в полосе ± 1 МГц от частоты пика. Поляризация волны определялась как соотношение между этими средними амплитудами: если $\langle b_r \rangle$ является наибольшей, то такая волна считается полоидальной, если $\langle b_a \rangle$ — то тороидальной, а если $\langle b_{\parallel} \rangle$ — то компрессионной. Далее в работе мы будем рассматривать только поперечные волны, когда либо $\langle b_a \rangle > \langle b_{\parallel} \rangle$, либо $\langle b_r \rangle > \langle b_{\parallel} \rangle$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение времени пребывания спутника по секторам MLT почти равномерно и имеет максимум в диапазоне $L=5.5-6.0$ (рис. 2, а). Этот максимум определяется апогеем орбиты спутника, однако из-за наклона орбиты он может смещаться на более высокие L -оболочки.

На рис. 2, б, в отчетливо видно, что распределения полоидальных и тороидальных волн в пространстве различаются. Тороидальные волны сосредоточены в вечернем и предполуденном секторах на больших L -оболочках, тогда как полоидальные волны в основном наблюдались вдоль пути дрейфа ионов от полуночи к полудню, через вечерний сектор с максимумами вблизи полудня и полуночи. Полученные распределения частоты появления тороидальных и полоидальных волн имеют как сходства, так и отличия от статистических исследований волн Pc4 и Pc5 по данным других космических аппаратов [Anderson, 1993; Liu et al., 2009]. Результат, представленный на рис. 2, в, соответствует распределению полоидальных Pc4 по данным Van Allen Probes, собранным за один полный обзор магнитосферы с октября 2012 г. по июль 2014 г. [Dai et al., 2015].

На рис. 3 приведено распределение значений отношения $\langle b_a \rangle$ к $\langle b_r \rangle$ в логарифмическом масштабе, которое оказалось близко к нормальному распределению со средним значением ~ 1 . Такой результат говорит о том, что у большинства наблюдаемых поперечных волн смешанная поляризация, а $\langle b_a \rangle \approx \langle b_r \rangle$.

Однако среднее значение $\langle b_a \rangle / \langle b_r \rangle$ меняется, если разделить волны по секторам MLT. На рис. 4 показаны распределения в четырех секторах MLT: дневном (MLT=09–15 ч), утреннем (MLT=03–09 ч), вечернем (MLT=15–21 ч) и ночном (MLT=21–03 ч). В дневном секторе встречались больше полоидальных волн, а в ночном — тороидальных. Параметры распределений в утреннем и вечернем секторах занимают промежуточное положение между дневным и ночным.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Еще в первых работах по теории альфвеновских волн было произведено разделение на азимутально-крупномасштабные тороидальные волны и азимутально-мелкомасштабные полоидальные волны [Radoski, 1967; Cummings et al., 1969]. Тороидальные связывали с внешними источниками генерации, а полоидальные — с внутренними [Chen, Hasegawa, 1991]. В статистическом исследовании [Anderson, 1993] наблюдаемые УНЧ-волны с периодами от 10 с до 10 мин были разделены на пять типов: полоидальные волны Pc4, фундаментальные моды тороидальных волн Pc5, высокие гармоники тороидальных волн, а также компрессионные волны Pc5 и некогерентный шум. В работе [Liu et al., 2009] по наблюдениям миссии THEMIS изучались отдельно тороидальные и полоидальные волны в диапазонах Pc4 и Pc5 и подчеркивались различия в их распределении в пространстве. В более поздних работах исследуются уже отдельные типы волн, например, полоидальные волны Pc4 [Dai et al., 2015] или тороидальные волны с несколькими гармониками [Yamamoto et al., 2022]. Существует также множество детальных исследований отдельных случаев наблюдения альфвеновских волн, которые, несмотря на наличие колебаний одновременно в нескольких направлениях, относят наблюдаемые волны к тороидальным или полоидальным в зависимости от направления, в котором амплитуда максимальна (например, [Dai et al., 2013; Korotova et al., 2016; Le et al., 2021]).

Возможность изменения поляризации альфвеновской волны рассматривалась [Radoski, 1974; Leonovich, Mazur, 1993, 1998; Mann, Wright, 1995], но ей уделялось мало внимания при анализе наблюдаемых явлений. Нам известно лишь несколько работ, описывающих наблюдение изменения поляризации по данным спутников [Zolotukhina et al., 2008; Sarris et al., 2009; Leonovich et al., 2015; Wei et al., 2019; Takahashi et al., 2018]. По распределениям, представленным на рис. 3 и 4, мы видим, что никакого строгого разделения на тороидальные и полоидальные волны нет. Статистика показывает, что поперечные волны обычно имеют смешанную поляри-

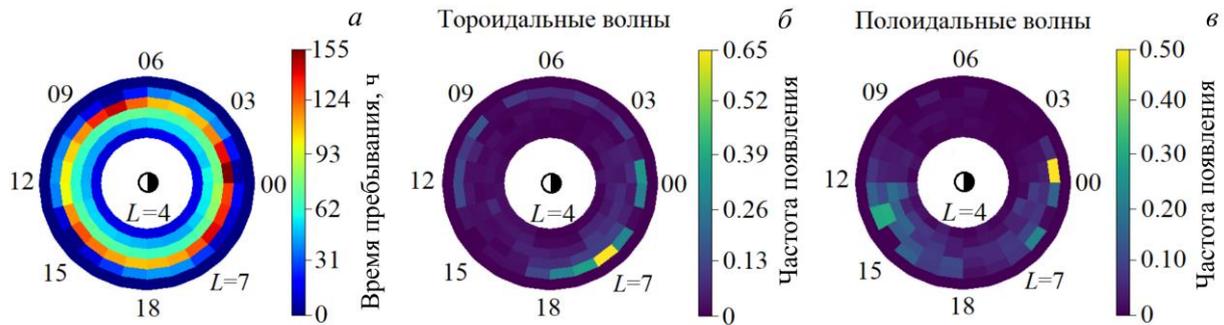


Рис. 2. Время пребывания спутника Van Allen Probe A во внешней магнитосфере с 1 января 2017 г. по 31 октября 2018 г. (а). Частота появления тороидальных (б) и полоидальных (в) волн. Результаты в проекции на экваториальную плоскость L — MLT, размер ячейки $0.5 R_E \times 1$ ч ($L > 4$)

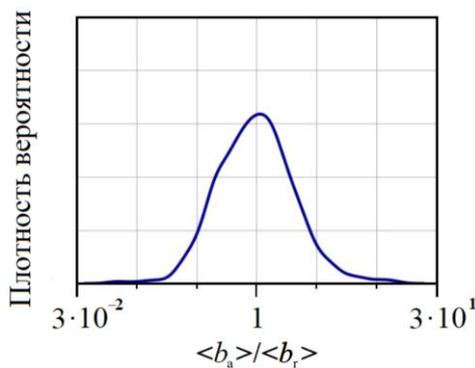


Рис. 3. Распределение отношения средних амплитуд колебаний в азимутальной и радиальной компонентах магнитного поля $\langle b_a \rangle / \langle b_r \rangle$ для поперечных волн

зацию и часто $\langle b_a \rangle \approx \langle b_r \rangle$. Аналогичный результат, но на меньшей статистике, следует из работы [Агапитов, Черемных, 2011], однако там он не был сформулирован в явном виде. В работах [Rubtsov et al., 2023a, b] по данным спутника Agase были получены похожие распределения. Мы предполагаем, что это следствие наблюдения процесса изменения поляризации альфвеновской волны на разных этапах. Большая статистика наблюдений как раз дает максимум плотности вероятности для случая, соответствующего середине процесса изменения, т. е. $\langle b_a \rangle \approx \langle b_r \rangle$.

Кроме того, удивление вызывает доминирование полоидальных волн на дневной стороне, где, казалось бы, должно наблюдаться больше тороидальных волн, генерируемых извне (рис. 4, б). В некоторых статистических исследованиях тоже обнаружена эта особенность [Chi, Le, 2015]. Возможно, она связана с существованием долгоживущих полоидальных волн, которые могут наблюдаться на дневной стороне в течение нескольких последовательных орбит Van Allen Probes [Korotova et al., 2016; Rubtsov et al., 2021]. Эти волны могут генерироваться в случае малого радиального градиента альфвеновской частоты [Choi, Lee, 2021] или являться модами поперечного альфвеновского резонатора [Leonovich, Mazur, 1990; Vetoulis, Chen, 1994; Klimushkin, 1998]. Для получения ответа на этот вопрос требуется дальнейшее изучение таких наблюдений.

Необходимо отметить, что представленные статистические результаты могут иметь неточности, связанные в том числе со способом определения поляризации волны. В работе анализировались средние амплитуды колебаний во всех компонентах магнитного поля за время наблюдения волны. Однако поперечные волны нечетных гармоник имеют узел вблизи магнитного экватора, что может приводить к недооценке их средних амплитуд. В то же время полоидальные альфвеновские волны при конечном давлении плазмы имеют компоненту вдоль силовых линий, у которой на экваторе находится пучность [Klimushkin et al., 2004]. В совокупности это может приводить к тому, что нечетные гармоники поперечных волн будут классифицироваться как компрессионные волны и не попадут в текущую статистику. Наиболее заметной компрессионной составляющей обладают полоидальные волны [Klimushkin et al., 2004], поэтому мы можем предполагать недооценку их количества в данной работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам наблюдений на спутнике Van Allen Probe A мы обнаружили, что в распределении поляризации поперечных УНЧ-волн отсутствуют отдельные максимумы, соответствующие чисто тороидальным и чисто полоидальным волнам. Распределение волн по поляризации является нормальным, и его максимум приходится на примерное равенство средних амплитуд колебаний азимутальной $\langle b_a \rangle$ и радиальной $\langle b_r \rangle$ составляющих магнитного поля. При этом максимум распределения смещается в разных секторах MLT: днем — в полоидальную область, а ночью — в тороидальную.

Полученные данные заставляют пересмотреть общепринятый подход к изучению альфвеновских волн с точки зрения теории, когда полоидальные и тороидальные волны рассматривались отдельно. Заметная асимметрия в пространстве указывает на постоянство факторов, определяющих ту или иную поляризацию волны. В дальнейшем важно определить, чем обусловлен полученный результат $\langle b_a \rangle \approx \langle b_r \rangle$: развитием волны или же работой разных механизмов возбуждения волн в одной и той же области прост-

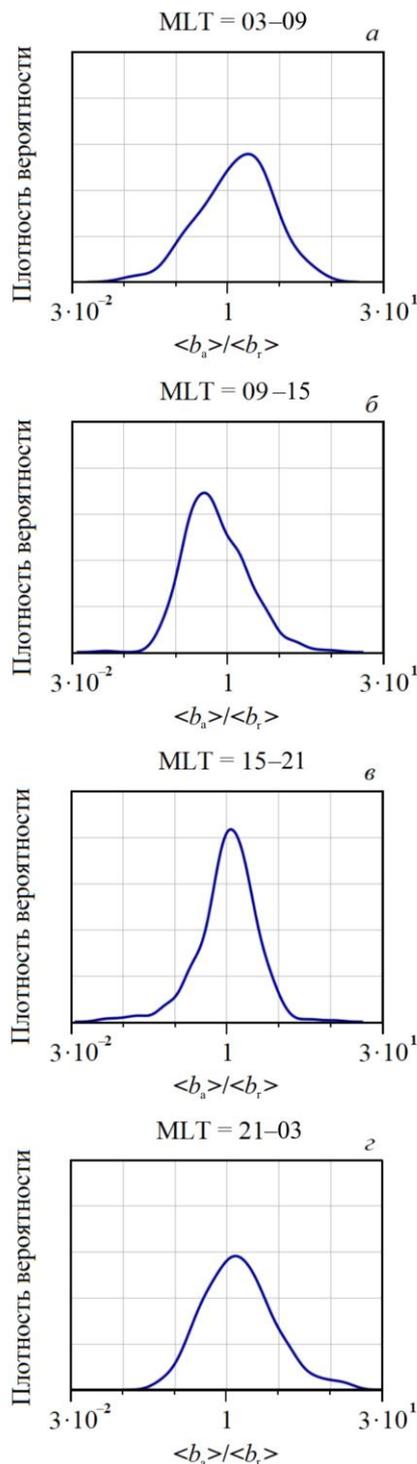


Рис. 4. Распределения $\langle b_a \rangle / \langle b_r \rangle$ для поперечных волн в утреннем (а), дневном (б), вечернем (в) и ночном (z) секторах магнитосферы

ранства. В первом случае необходимо выяснить пространственные и временные масштабы изменения поляризации. Во втором случае возникают вопросы о том, какой механизм отвечает за генерацию конкретной поляризации (тороидальной и полоидальной) и могут ли эти механизмы действовать одновременно или последовательно, что и приводит к статистическому результату $\langle b_a \rangle \approx \langle b_r \rangle$. Наконец, важно выяснить, как альфвеновские волны и в пер-

вом, и во втором случае взаимодействуют с заряженными частицами внутри магнитосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Авторы благодарят NASA за миссию Van Allen Probes и Крейга Клетцинга (Craig Kletzing) за возможность использовать данные инструмента EMFISIS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агапитов А.В., Черемных О.К. Поляризация резонансных УНЧ-возмущений в магнитосфере Земли. *Кинематика и физика небесных тел*. 2011. Т. 27, № 3. С. 17–27.

Головчанская И.В., Корнилов И.А., Корнилова Т.А. и др. Признаки альфвеновского резонанса в поведении авроральных дуг перед началом суббури. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2018. Т. 58, № 1. С. 46–52. DOI: [10.7868/S0016794018010078](https://doi.org/10.7868/S0016794018010078).

Гульельми А.В., Троицкая В.А. *Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы*. М.: Наука, 1973. 208 с.

Климушкин Д.Ю., Магер П.Н., Челпанов М.А., Костарев Д.В. Взаимодействие длиннопериодных УНЧ-волн и заряженных частиц в магнитосфере: теория и наблюдения (обзор). *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 35–69. DOI: [10.12737/szf-74202105](https://doi.org/10.12737/szf-74202105).

Леонович А.С., Мишин В.В. Поток энергии магнитозвуковых волн из солнечного ветра в магнитосферу. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 1999. Т. 39, № 2. С. 52–58.

Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. Генерация альфвеновских волн движущейся неоднородностью плазмы в магнитосфере. *Физика плазмы*. 2007. Т. 33, № 5. С. 435–442.

Agapitov A.V., Cheremnykh O.K. Magnetospheric ULF waves driven by external sources. *Adv. Astron. Space Phys.* 2013. Vol. 3. P. 12–19.

Anderson B.J. Statistical studies of Pc 3–5 pulsations and their relevance for possible source mechanisms of ULF waves. *Ann. Geophys.* 1993. Vol. 11. P. 128–143.

Antonova E.E., Kornilov I.A., Kornilova T.A., et al. Features of auroral breakup obtained using data of ground-based television observations: Case study. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27. P. 1413–1422. DOI: [10.5194/angeo-27-1413-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1413-2009).

Chen L., Hasegawa A. Kinetic theory of geomagnetic pulsations: 1. Internal excitations by energetic particles. *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, no. A2. P. 1503–1512. DOI: [10.1029/90JA02346](https://doi.org/10.1029/90JA02346).

Chi P.J., Le G. Observations of magnetospheric high-*m* poloidal waves by ST-5 satellites in low Earth orbit during geomagnetically quiet times. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 4776–4783. DOI: [10.1002/2015JA021145](https://doi.org/10.1002/2015JA021145).

Choi J., Lee D.-H. On the persistent poloidal Alfvén waves. *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, e2021GL092945. DOI: [10.1029/2021GL092945](https://doi.org/10.1029/2021GL092945).

Cummings W.D., O’Sullivan R.J., Coleman Jr. P.J. Standing Alfvén waves in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1969. Vol. 74, no. 3. P. 778–793. DOI: [10.1029/JA074i003p00778](https://doi.org/10.1029/JA074i003p00778).

Dai L., Takahashi K., Wygant J.R., et al. Excitation of poloidal standing Alfvén waves through drift resonance wave-particle interaction. *Geophys. Res. Lett.* 2013. Vol. 40. P. 4127–4132. DOI: [10.1002/grl.50800](https://doi.org/10.1002/grl.50800).

Dai L., Takahashi K., Lysak R., et al. Storm time occurrence and spatial distribution of Pc4 poloidal ULF waves in the inner magnetosphere: A Van Allen Probes statistical study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 4748–4762. DOI: [10.1002/2015JA021134](https://doi.org/10.1002/2015JA021134).

Guglielmi A., Lundin R. Ponderomotive upward acceleration of ions by ion cyclotron and Alfvén waves over the polar regions. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106, iss. A7. P. 13219–13236. DOI: [10.1029/2000JA900066](https://doi.org/10.1029/2000JA900066).

Hughes W.J., Southwood D.J. The screening of micropulsation signals by the atmosphere and ionosphere. *J. Geophys.*

Res. 1976. Vol. 81, iss. 19. P. 3234–3240. DOI: [10.1029/JA081i019p03234](https://doi.org/10.1029/JA081i019p03234).

Kletzing C.A., Kurth W.S., Acuna M., et al. The Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) on RBSP. *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 179. P. 127–181. DOI: [10.1007/s11214-013-9993-6](https://doi.org/10.1007/s11214-013-9993-6).

Klimushkin D.Yu. Resonators for hydromagnetic waves in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, iss. A2. P. 2369–2375. DOI: [10.1029/97JA02193](https://doi.org/10.1029/97JA02193).

Klimushkin D.Yu., Leonovich A.S., Mazur V.A. On the propagation of transversally small-scale standing Alfvén waves in a three-dimensionally inhomogeneous magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100, iss. A6. P. 9527–9534. DOI: [10.1029/94JA03233](https://doi.org/10.1029/94JA03233).

Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Glassmeier K.-H. Toroidal and poloidal Alfvén waves with arbitrary azimuthal wave numbers in a finite pressure plasma in the Earth's magnetosphere. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22. P. 267–287. DOI: [10.5194/angeo-22-267-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-267-2004).

Korotova G., Sibeck D., Engebretson M., et al. Multipoint spacecraft observations of long-lasting poloidal Pc4 pulsations in the dayside magnetosphere on 1–2 May 2014. *Ann. Geophys.* 2016. Vol. 23. P. 985–998. DOI: [10.5194/angeo-34-985-2016](https://doi.org/10.5194/angeo-34-985-2016).

Kostarev D.V., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Alfvén wave parallel electric field in the dipole model of the magnetosphere: Gyrokinetic treatment. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126, e2020JA028611. DOI: [10.1029/2020JA028611](https://doi.org/10.1029/2020JA028611).

Le G., Chi P.J., Strangeway R.J., et al. MMS observation of field line resonances under disturbed solar wind conditions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021. Vol. 126, e2020JA028936. DOI: [10.1029/2020JA028936](https://doi.org/10.1029/2020JA028936).

Leonovich A.S., Mazur V.A. The spatial structure of poloidal Alfvén oscillations of an axisymmetric magnetosphere. *Planet. and Space Sci.* 1990. Vol. 38, iss. 10. P. 1231–1241. DOI: [10.1016/0032-0633\(90\)90128-D](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90128-D).

Leonovich A.S., Mazur V.A. A theory of transverse small-scale standing Alfvén waves in an axially symmetric magnetosphere. *Planet. and Space Sci.* 1993. Vol. 41, iss. 9. P. 697–717. DOI: [10.1016/0032-0633\(93\)90055-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90055-7).

Leonovich A.S., Mazur V.A. Standing Alfvén waves with $m \gg 1$ in an axisymmetric magnetosphere excited by a non-stationary source. *Ann. Geophys.* 1998. Vol. 16. P. 914–920. DOI: [10.1007/s00585-998-0914-z](https://doi.org/10.1007/s00585-998-0914-z).

Leonovich A.S., Klimushkin D.Yu., Mager P.N. Experimental evidence for the existence of monochromatic transverse small-scale standing Alfvén waves with spatially dependent polarization. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 5443–5454. DOI: [10.1002/2015JA021044](https://doi.org/10.1002/2015JA021044).

Liu W., Sarris T.E., Li X., et al. Electric and magnetic field observations of Pc4 and Pc5 pulsations in the inner magnetosphere: A statistical study. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. A12206. DOI: [10.1029/2009JA014243](https://doi.org/10.1029/2009JA014243).

Mann I.R., Wright A.N. Finite lifetimes of ideal poloidal Alfvén waves. *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100, iss. A12. P. 23677–23686. DOI: [10.1029/95JA02689](https://doi.org/10.1029/95JA02689).

Mauk B.H., Fox N.J., Kanekal S.G., et al. Science objectives and rationale for the Radiation Belt Storm Probes mission. *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 179. P. 3–27. DOI: [10.1007/s11214-012-9908-y](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9908-y).

McIlwain C.E. Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles. *J. Geophys. Res.* 1961. Vol. 66, iss. 11. P. 3681–3691. DOI: [10.1029/JZ066i011p03681](https://doi.org/10.1029/JZ066i011p03681).

Radoski H.R. Highly asymmetric MHD resonances: the guided poloidal mode. *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72, iss. 15. P. 4026–4027. DOI: [10.1029/JZ072i015p04026](https://doi.org/10.1029/JZ072i015p04026).

Radoski H.R. A theory of latitude dependent geomagnetic micropulsations: the asymptotic fields. *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79. P. 595–613. DOI: [10.1029/JA079i004p00595](https://doi.org/10.1029/JA079i004p00595).

Rubtsov A.V., Mikhailova O.S., Mager P.N., et al. Multi-spacecraft observation of the presubstorm long-lasting poloidal ULF wave. *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, iss. 23. e2021GL096182. DOI: [10.1029/2021GL096182](https://doi.org/10.1029/2021GL096182).

Rubtsov A.V., Nosé M., Matsuoka A., et al. Polarization and spatial distribution features of Pc4 and Pc5 waves in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023a. Vol. 128, e2023JA031674. DOI: [10.1029/2023JA031674](https://doi.org/10.1029/2023JA031674).

Rubtsov A.V., Nosé M., Matsuoka A., et al. Plasmasphere control of ULF wave distribution at different geomagnetic conditions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023b. Vol. 128, e2023JA031675. DOI: [10.1029/2023JA031675](https://doi.org/10.1029/2023JA031675).

Samson J.C., Wallis D.D., Hughes T.J., et al. Substorm intensifications and field line resonances in the nightside magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97, iss. A6. P. 8495–8518. DOI: [10.1029/91JA03156](https://doi.org/10.1029/91JA03156).

Sarris T.E., Wright A.N., Li X. Observations and analysis of Alfvén wave phase mixing in the Earth's magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114, A03218. DOI: [10.1029/2008JA013606](https://doi.org/10.1029/2008JA013606).

Takahashi K., Denton R.E., Gallagher D. Toroidal wave frequency at $L=6-10$: Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers/CCE observations and comparison with theoretical model. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2002. Vol. 107, iss. A2, 1020. DOI: [10.1029/2001JA000197](https://doi.org/10.1029/2001JA000197).

Takahashi K., Claudepierre S.G., Rankin R., et al. Van Allen Probes observation of a fundamental poloidal standing Alfvén wave event related to giant pulsations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123, iss. 6. P. 4574–4593. DOI: [10.1029/2017JA025139](https://doi.org/10.1029/2017JA025139).

Vetoulis G., Chen L. Global structures of Alfvén-ballooning modes in magnetospheric plasmas. *Geophys. Res. Lett.* 1994. Vol. 21, no. 19. P. 2091–2094. DOI: [10.1029/94GL01703](https://doi.org/10.1029/94GL01703).

Wei C., Dai L., Duan S.P., et al. Multiple satellites observation evidence: High- m Poloidal ULF waves with time-varying polarization states. *Earth and Planet. Phys.* 2019. Vol. 3, no. 3. P. 190–203. DOI: [10.26464/epp2019021](https://doi.org/10.26464/epp2019021).

Yamamoto K., Seki K., Matsuoka A., et al. A statistical study of the solar wind dependence of multi-harmonic toroidal ULF waves observed by the Arase satellite. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. Vol. 127, e2021JA029840. DOI: [10.1029/2021JA029840](https://doi.org/10.1029/2021JA029840).

Zolotukhina N.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Pc5 waves generated by substorm injection: a case study. *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26. P. 2053–2059. DOI: [10.5194/angeo-26-2053-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-2053-2008).

Как цитировать эту статью:

Якимчук А.И., Рубцов А.В., Климушкин Д.Ю. Распределение поляризации поперечных УНЧ-волн по данным Van Allen Probe A: существуют ли раздельно тороидальные и полоидальные волны в магнитосфере? *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 4. С. 80–85. DOI: [10.12737/szf-94202309](https://doi.org/10.12737/szf-94202309).