УДК 533.951.2 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-177

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВО СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ ВОЛН ДИАПАЗОНА Pc1 В МАГНИТОСФЕРЕ

О.С. Михайлова, П.Н. Магер

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия,
o_mikhailova@iszf.irk.ru

EXPERIMENTAL PROOF OF THE EXISTENCE OF AN EQUATORIAL RESONATOR FOR Rc1 WAVES IN THE MAGNETOSPHERE

O.S. Mikhailova, P.N. Mager

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

Аннотация. Показано существование приэкваториального резонатора для ионно-ионных гибридных мод на примере события жемчужин Pc1, наблюдавшихся зондом Ван Аллена А 14 июля 2014 г. Наблюдались пульсации Pc1 с частотами от 0,9 до 1,3 Гц. Частота пульсаций была чуть выше гирочастоты гелия. Во время этого события мы обнаружили высокие концентрации гелия и кислорода. Отношение плотности гелия к плотности протона составляло около 1, а кислорода к протону — выше 10. Из теории известно, что из-за примеси тяжелых ионов в плазме магнитосферы может образоваться резонатор в верхней части магнитной силовой линии. Мы получили, что рассчитанные собственные частоты приэкваториального резонатора соответствуют наблюдаемым частотам. Мы рассматриваем наблюдаемую структуру волн как результат суперпозиции нескольких гармоник со слегка отличающимися частотами внутри резонатора.

Ключевые слова: Пульсации Pc1, жемчужины, ионно-ионные гибридные моды, магнитосфера

Abstract. We showed the existence of a near-equatorial resonator for ion-ion hybrid modes. The Pc1 pearl event was observed by the Van Allen Probe A on July 14, 2014. Pc1 pulsations had frequencies from 0.9 to 1.3 Hz. The pulsation frequency was slightly higher than the helium gyrofrequency. During the event, we detected high concentrations of helium and oxygen. The ratio of helium number density to proton density density was about 1, and oxygen number density to proton number density was above 10. Theory says that due to the admixture of heavy ions in the magnetosphere's plasma, a resonator can form at the top of the magnetic field line. We have found that the calculated eigenfrequencies of the near-equatorial resonator correspond to the observed frequencies of the Pc1 wave. We consider the observed wave structure as the result of a superposition of several eigenharmonics with slightly different frequencies inside the resonator.

Keywords: Pc1 pulsations, pearls, ion-ion hybrid modes, magnetosphere

ВВЕДЕНИЕ

В наших предыдущих статьях мы рассматривали одну из гипотез формирования жемчужной структуры пульсаций диапазона Pc1 [Klimushkin et al., 2010; Mikhailova, 2014; Mikhailova et al., 2020a; Mikhailova et al., 2020b; Михайлова и др., 2022]. Согласно гипотезе, из-за примеси тяжелых ионов (гелия или кислорода) в плазме магнитосферы может образоваться резонатор в экваториальной части магнитной силовой линии. Резонатор служит резервуаром энергии, частоты наблюдаемых Pc1 соответствуют частотам возбуждаемых в резонаторе гармоник, а наблюдаемая структура жемчужин является результатом суперпозиции собственных гармоник резонатора, частоты которых слегка отличаются. Гармоники в резонаторе называются ионно-ионными гибридными (ИИГ) модами, так как возникают в плазме в присутствии нескольких типов ионов, например, протонов и ионов кислорода. Мы выбрали событие, когда наблюдались жемчужины Pc1, для верификации модели экваториального резонатора для ИИГ-мод.

НАБЛЮДАЕМОЕ СОБЫТИЕ

В целях верификации нашей модели, было выбрано событие 14 июля 2014 г. Спутниками Van Allen Probe A и B наблюдалась волна диапазона Pc1, имеющая форму жемчужин. На рис. 1 показаны осцилляции в компонентах магнитного поля.

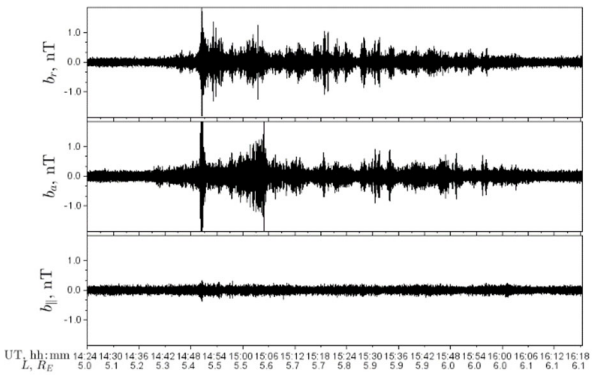

Рис. 1. Осцилляции радиальной, азимутальной и продольной компонент магнитного поля

Частота наблюдаемой волны менялась очень слабо, от 0,9 до 1,3 Гц, и менялась при этом ступенчато-образно. Это свидетельствует о резонаторной природе наблюдаемых колебаний. Кроме этого, о наличии резонатора свидетельствует значение вектора Пойнтинга, значение которого колебалось в окрестности нуля. Это говорит о том, что волна стоячая. Волна наблюдалась вблизи верхней кромки плазмопаузы. Во время этого события мы обнаружили высокие концентрации гелия и кислорода. Отношение плотности гелия к плотности протона составляло около 1, а кислорода к протону - более 10 (см. рис. 2).

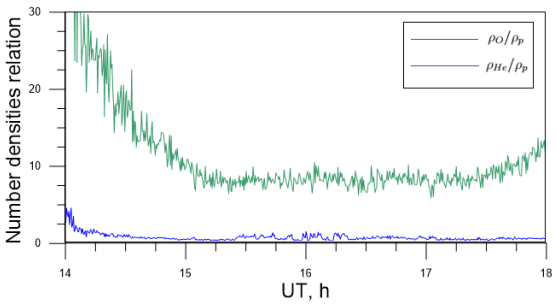

Рис. 2. Отношение плотностей тяжелых ионов к плотности протонов. Зеленая линия — кислород, синяя — гелий

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

На основе этого события была сделана попытка верифицировать модель экваториального резонатора для ИИГ-мод. Сначала в качестве тяжелых ионов были приняты ионы кислорода, поскольку мы наблюдаем очень высокое отношение плотности кислорода к плотности протона (рис. 2), но расчетная частота оказалась слишком низкой. Тогда было принято решение рассмотреть в качестве тяжелых ионов гелий, поскольку наблюдаемая частота пульсаций чуть выше гирочастоты гелия. И снова оказалось, что расчетная частота принимает слишком низкие значения. Это означает, что необходимо учитывать все три типа ионов: протоны, гелий и кислород.

Для этого необходимо рассмотреть структуру волны в плазме, состоящей из протонов, ионов гелия и ионов кислорода. Частота волны ω предполагается много меньше гирочастоты протонов $\omega \ll \Omega_p$. Решая волновое уравнение для ИИГ-моды в таких условиях, мы получили продольную структуру волны:

$$k_\parallel^2 = \frac{\omega^2}{A_p^2}\left[\left(1-\frac{\omega^2}{\Omega_p^2}\right)^{-1} + \frac{\rho_{He}}{\rho_p}\left(1-\frac{\omega^2}{\Omega_{He}^2}\right)^{-1} + \frac{\rho_O}{\rho_p}\left(1-\frac{\omega^2}{\Omega_O^2}\right)^{-1}\right]. \quad (1)$$

Видно, что продольная структура зависит от отношения плотностей ионов гелия к протонам $\frac{\rho_{He}}{\rho_p}$, и от отношения плотностей ионов кислорода к протонам $\frac{\rho_O}{\rho_p}$, A_p^2 — квадрат альфвеновской скорости протонов, Ω_{He} и Ω_O — гирочастоты гелия и кислорода. В экваториальной части силовой линии, как и в прежних исследованиях [Михайлова и др., 2022], формируется резонатор, ограниченный точками поворота. Точки поворота могут быть найдены из условия $k_\parallel^2(\Omega_\pm) = 0$, где $\Omega_\pm$ - две возможные частоты в точках поворота. В многокомпонентной плазме с тремя типами ионов могут существовать три ветви колебаний. Первая с частотой $\omega < \Omega_O$ — альфвеновская волна, и две ИИГ-моды с частотами, лежащими в диапазонах $\Omega_- < \omega < \Omega_{He}$ и $\Omega_+ < \omega \ll \Omega_p$, как показано на рис. 3.

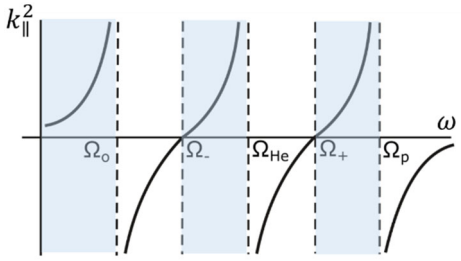

Рис. 3. Три ветви колебаний в плазме с тремя видами ионов

Найден спектр собственных частот резонатора. Полученные частоты хорошо согласуются с частотой наблюдаемой волны Pc1. На рис. 4 представлена рассчитанная частота для фундаментальной гармоники резонатора, показана белой линией. Видно, что рассчитанная частота повторяет ход наблюдаемой частоты, и близка к ней по значению. Частоты гармоник, возбуждаемых в резонаторе, близки друг к другу. В результате суперпозиции собственных гармоник резонатора, формируются биения жемчужин. Разница между частотами двух близких гармоник совпадает по порядку величины с частотой наблюдаемых биений.

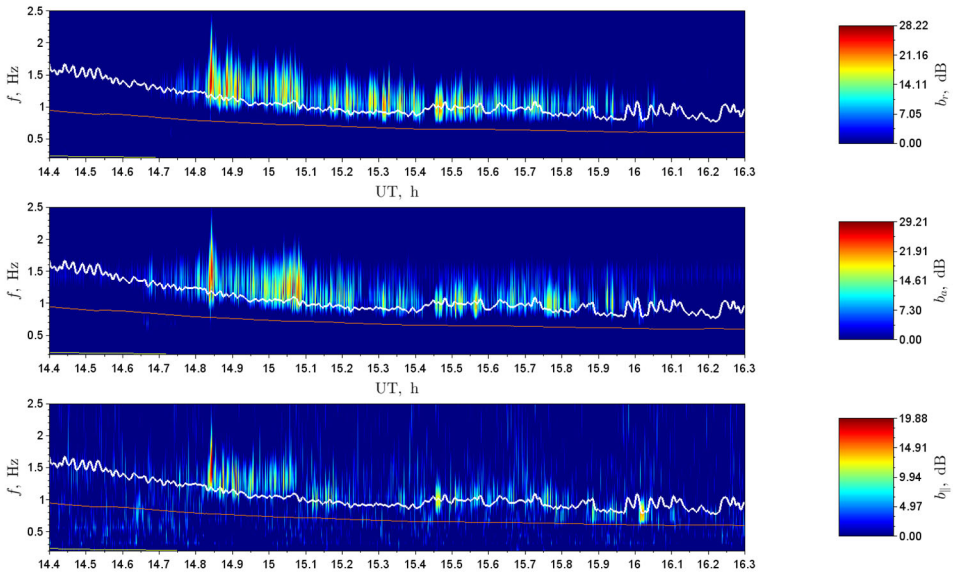

Рис. 4. Вейвлет-спектры в компонентах магнитного поля. Оранжевой линией показана гирочастота гелия, белой линией — рассчитанная частота фундаментальной ИИГ-гармоники в резонаторе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано существование в магнитосфере приэкваториального резонатора для ИИГ-мод. На примере отдельного волнового события Pc1 показана резонаторная природа колебаний. Частота волны определяется собственными частотами резонатора, а частота биения определяется разницей двух близких частот. Показано, что нельзя исключать из рассмотрения какой-либо вид ионов, необходимо учитывать ионы гелия и кислорода. Рассчитанная модельная частота в таком случае хорошо согласуется с наблюдаемой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Михайлова О.С., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю. Современное состояние теории УНЧ-пульсаций диапазона Pc1 в плазме магнитосферы с тяжелыми ионами: обзор // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 1. С. 3–18. DOI: 10.12737/szf-81202201.

Klimushkin D.Yu., Mager P.N., Marilovtseva O.S. Parallel structure of Pc1 ULF oscillations in multi-ion magnetospheric plasma at finite ion gyrofrequency // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2010. V. 72, N 18. P. 1327–1332. DOI: 10.1016/j.jastp.2010.09.019.

Mikhailova O.S. The spatial structure of ULF-waves in the equatorial resonator localized at the plasmapause with the admixture of the heavy ions // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2014. V. 108. P. 10–16. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.12.007.

Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. Two modes of ion-ion hybrid waves in magnetospheric plasma // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020a. V. 62, N 2. P. 025026. DOI: 10.1088/1361-6587/ab5b32.

Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D. Yu. Transverse resonator for ion-ion hybrid waves in dipole magnetospheric plasma // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020b. V. 62, N 9. P. 095008. DOI: 10.1088/1361-6587/ab9be9.