

ВОЛНЫ АЛЬВЕНА: К 80-ЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ

ALFVÉN WAVES: TO THE 80th ANNIVERSARY OF DISCOVERY

А.В. Гульельми 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, guglielmi@mail.ru*

Б.И. Клайн 

*Геофизическая обсерватория «Борок»
филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Борок, Россия, klb314@mail.ru*

А.С. Потапов 

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

A.V. Guglielmi

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Moscow, Russia, guglielmi@mail.ru*

B.I. Klain

*Borok Geophysical Observatory
the Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,
Borok, Russia, klb314@mail.ru*

A.S. Potapov

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

Аннотация. Статья посвящена юбилею открытия волн Альвена. Представление о волнах Альвена сыграло выдающуюся роль в становлении и развитии космической электродинамики. Их отличительная особенность состоит в том, что в каждой точке пространства вектор групповой скорости и вектор внешнего магнитного поля коллинеарны друг другу. В результате волны Альвена могут переносить импульс, энергию и информацию на большие расстояния. Мы кратко описываем два резонатора Альвена, один из которых формируется в ионосфере, а второй, предположительно, существует в радиационном поясе Земли. Существование ионосферного резонатора обосновано теоретически и подтверждено многочисленными наблюдениями. Второй резонатор располагается между точками отражения, расположенными высоко над Землей симметрично относительно плоскости геомагнитного экватора.

Ключевые слова: скорость Альвена, закон дисперсии, групповая скорость, геометрическая оптика, тяжелые ионы.

Abstract. The article is dedicated to the anniversary of the discovery of Alfvén waves. The concept of Alfvén waves has played an outstanding role in the formation and development of cosmic electrodynamics. A distinctive feature of Alfvén waves is that at each point in space the group velocity vector and the external magnetic field vector are collinear to each other. As a result, Alfvén waves can carry momentum, energy, and information over long distances. We briefly describe two Alfvén resonators, one of which is formed in the ionosphere, and the second presumably exists in Earth's radiation belt. The existence of the ionospheric resonator is justified theoretically and confirmed by numerous observations. The second resonator is located between reflection points located high above Earth symmetrically with respect to the plane of the geomagnetic equator.

Keywords: Alfvén velocity, dispersion law, group velocity, geometrical optics, heavy ions.

Волны с законом дисперсии $\omega = c_A k_{\parallel}$ называют волнами Альвена в честь Ханнеса Альвена, который открыл их 80 лет тому назад [Alfvén, 1942]. Здесь ω — частота волны; $k_{\parallel} = \mathbf{k}\mathbf{V} / |\mathbf{V}|$; \mathbf{k} — волновой вектор; \mathbf{V} — внешнее магнитное поле; $c_A = B / \sqrt{4\pi\rho}$ — скорость Альвена; ρ — плотность плазмы. Представление о волнах Альвена сыграло значительную роль в становлении и развитии космической электродинамики [Альвен, 1952]. Невозможно здесь привести даже выборочно колоссальное количество источников, посвященных волнам Альвена. В честь выдающегося открытия мы лишь кратко опишем два резонатора Альвена, один из которых формируется в ионосфере, а второй, предположительно, существует в радиационном поясе Земли.

Отличительная особенность волн Альвена состоит в том, что вектор \mathbf{V} и вектор групповой скорости $\mathbf{v} = d\omega / d\mathbf{k}$ коллинеарны друг другу: $\mathbf{v} = \pm \mathbf{V} / \sqrt{4\pi\rho}$. Знаки $+$ и $-$ соответствуют неравенствам $\mathbf{k}\mathbf{V} > 0$ и $\mathbf{k}\mathbf{V} < 0$. Из свойства коллинеарности вытекают уди-

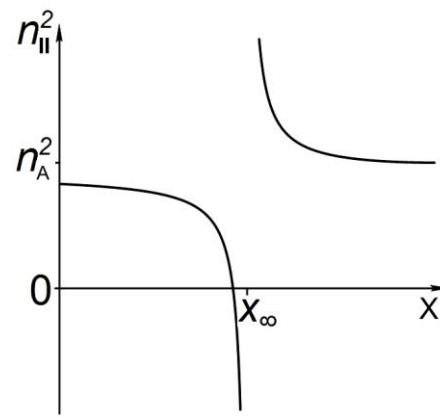
вательные следствия. Волны Альвена могут переносить импульс, энергию и информацию на большие расстояния. Недавние наблюдения свидетельствуют, что квазимонохроматические колебания с несущей частотой 3.3 мГц переносятся волнами Альвена на 150 млн. км — от поверхности Солнца до поверхности Земли [Guglielmi et al., 2015; Гульельми, Потапов, 2021].

Еще одно следствие коллинеарности имеет прямое отношение к резонаторам Альвена. В приближении геометрической оптики волна Альвена в однородной среде испытывает рефракцию, но не теряет свойства направленности. Другими словами, если, например $\mathbf{k}\mathbf{V} > 0$, то это неравенство может смениться на противоположное только лишь при нарушении условий применимости геометрической оптики. Допустим, в Северном полушарии в слое F2 ионосферы геометрическая оптика работает и $\mathbf{k}\mathbf{V} > 0$. Волна распространяется вниз и достигает слоистой структуры, состоящей из нижних слоев ионосферы, атмосферы и верхнего слоя

литосферы, толщина которого порядка скин-длины. Очевидно, в этих слоях происходит резкое нарушение условий применимости геометрической оптики. Возникает отраженная волна Альвена, бегущая вверх ($\mathbf{k}\mathbf{V} < 0$). Она пересекает слой F2 и проникает в экзосферу. Здесь происходит быстрое нарастание скорости Альвена $c_A = V / \sqrt{4\pi\rho}$ за счет быстрого убывания с высотой плотности плазмы ρ . Условия приближения геометрической оптики вновь нарушаются, и возникает волна, бегущая вниз. Нетрудно понять, что таким образом формируются стоячие волны Альвена с гармонической структурой спектра, запертые в ионосферном резонаторе. Физико-математический расчет и наблюдение геоэлектромагнитных УНЧ-колебаний в диапазоне Pc1 (0.2–5 Гц) убедительно свидетельствуют о существовании ионосферного резонатора Альвена [Беляев, Поляков, 1980; Potapov et al., 2014]. Любопытно, что для резонатора характерно распределение спектральных линий по нечетным гармоникам [Potapov et al., 2022].

Чтобы представить структуру второго резонатора, расположенного высоко над Землей в приэкваториальной области радиационного пояса, сделаем небольшой экскурс в кристаллооптику [Ландау, Лифшиц, 2003]. Рассмотрим сильно анизотропный одноосный кристалл и приведем тензор диэлектрической проницаемости к диагональному виду. Из уравнения Френеля следует, что дисперсионное уравнение для необыкновенной волны подобно дисперсионному уравнению для волны Альвена [Гульельми, 1979]. Эта аналогия подсказывает следующий вопрос: как изменится дисперсионное уравнение, если в тензоре диэлектрической проницаемости учесть недиагональные члены, оставляя, однако, тензор эрмитовым? Другими словами, мы хотим придать среде гиротропные свойства и сразу укажем, как это можно сделать в водородной магнитоактивной плазме. Оказывается, достаточно представить, что водородная плазма содержит небольшую примесь тяжелых ионов, например, ионов кислорода O^+ [Гинцбург, 1963].

Используем эти общие сведения для анализа волн Альвена во внешнем радиационном поясе в небольшой окрестности геомагнитного экватора. На рисунке изображена дисперсионная кривая в водородной плазме, содержащей весьма малую примесь ионов кислорода. Частота волн предполагается близкой к гирочастоте ионов O^+ в этой области. По горизонтальной оси отложено расстояние вдоль силовой линии геомагнитного поля. Начало координат совпадает с точкой пересечения силовой линии с экватором. Вдоль оси X меняется напряженность магнитного поля, а следовательно, и гирочастота ионов. По вертикальной оси отложен квадрат продольного показателя преломления $n_{\parallel} = ck_{\parallel} / \omega$. Он практически совпадает с квадратом показателя преломления волн Альвена $n_A = c / c_A$ всюду, кроме узкой полосы в окрестности резонанса, при котором локальная гирочастота ионов O^+ совпадает с частотой волны. Обратим внимание на то, что несколько левее резонанса располагается точка



Дисперсионная кривая в окрестности экватора силовой линии геомагнитного поля (см. текст)

поворота ($n_{\parallel} = 0$), в окрестности которой неприменимо приближение геометрической оптики. Итак, волна, бегущая слева направо, отражается от точки поворота. Отраженная волна распространяется справа налево, пересекает экватор и отражается от вполне аналогичной точки поворота, расположенной в противоположной полусфере магнитосферы. Процесс повторяется и формируется резонатор [Guglielmi et al., 2000] (см. также [Гульельми, Потапов, 2012, 2021; Михайлова, 2017]). Таким образом, теория предсказывает, что между точками отражения, расположенными высоко над Землей симметрично относительно плоскости геомагнитного экватора, располагается приэкваториальный резонатор Альвена.

В заключение следует сказать, что теория Альвена радикально обогатила не только линейную, но и нелинейную физику космоса. В частности, спутниковые наблюдения убедительно свидетельствуют о существенном воздействии волн Альвена на плазму в магнитосфере Земли за счет пондеромоторных сил [Lundin, Guglielmi, 2006].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00280, [<https://rscf.ru/project/22-27-00280>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альвен Х. *Космическая электродинамика*. 1952. М.: ИЛ, 260 с.
- Беляев П.П., Поляков С.В. Граничные условия для МГД-волн на ионосфере. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1980. Т. 20, № 4. С. 637–641.
- Гинцбург М.А. Низкочастотные волны в многокомпонентной плазме. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1963. Т. 3. С. 757–761.
- Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. 139 с.
- Гульельми А.В., Потапов А.С. Влияние тяжелых ионов на спектр колебаний магнитосферы. *Космические исследования*. 2012. Т. 50, № 4. С. 283–291.
- Гульельми А.В., Потапов А.С. Частотно-модулированные ультранизкочастотные волны в околоземном космическом пространстве. *УФН*. 2021. Т. 191, № 5. С. 475–491. DOI: [10.3367/UFNr.2020.06.038777](https://doi.org/10.3367/UFNr.2020.06.038777).
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Электродинамика сплошных сред*. Том VIII. Теоретическая физика. Издание 4-е, стереотипное. М.: Физматлит, 2003. 656 с.

Михайлова О.С. Короткопериодные УНЧ-волны в многокомпонентной космической плазме: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.29. Иркутск, 2017. 16 с.

Alfvén H. Existence of electromagnetic-hydrodynamic waves. *Nature*. 1942. Vol. 150. P. 405–406.

Guglielmi A., Potapov A., Russell C. The ion cyclotron resonator. *JETP Letters*. 2000. Vol. 72, iss. 6. P. 432–435.

Guglielmi A., Potapov A., Dovbnya B. Five-minute solar oscillations and ion-cyclotron waves in the solar wind. *Solar Phys.* 2015. Vol. 290, no. 10. P. 3023–3032. DOI: [10.1007/s11207-015-0772-2](https://doi.org/10.1007/s11207-015-0772-2).

Lundin R., Guglielmi A. Ponderomotive forces in Cosmos. *Space Sci. Rev.* 2006. Vol. 127, no. 1-4. P. 1–116. DOI: [10.1007/s11214-006-8314-8](https://doi.org/10.1007/s11214-006-8314-8).

Potapov A.S., Polyushkina T.N., Dovbnya B.V., et al. Emissions of ionospheric Alfvén resonator and ionospheric conditions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 119. P. 91–101. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.07.001).

Potapov A.S., Guglielmi A.V., Klain B.I. Discrete spectrum of ULF oscillations of the ionosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. Vol. 60, art. no. 4600505. DOI: [10.1109/TGRS.2021.3092738](https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3092738).

URL: <https://rscf.ru/project/22-27-00280> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Гульельми А.В., Клайн Б.И., Потапов А.С. Волны Альвена: к 80-летию открытия. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 2. С. 75–77. DOI: [10.12737/szf-82202210](https://doi.org/10.12737/szf-82202210).