



УДК 533.951, 539

Т.М. Заборонкова, д.ф.-м. н., профессор, ФГБОУ ВО «НГТУ» им. Р.Е. Алексеева,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Е.Н. Мясников, д.ф.-м. н., зав. кафедрой физики ФГБОУ ВО «ВГУВТ»,
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ РАСПРОСТРАНЯЮЩИЕСЯ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Ключевые слова: магнитная гидродинамика (МГД), МГД-волны в ионосферной плазме, мощный КВ нагревный стенд «СУРА».

В настоящей работе на основании экспериментальных данных о релаксации неоднородностей электронной концентрации, полученных при воздействии на F-слой ионосферы мощного коротковолнового (КВ) радиоизлучения, в приближении двухжидкостной МГД предлагается интерпретация наблюдаемому в эксперименте эффекту эхо-рассеяния.

Исследования неоднородной структуры плазмы в F-слое верхней ионосферы показали, что как в естественных условиях, так и при искусственном воздействии на плазму (нагрев мощным радиоизлучением, выбросы химически активных реагентов и т.п.) происходит генерация электростатических и электромагнитных волн, которые приводят к образованию неоднородностей электронной концентрации с различными масштабами. Вследствие высокой проводимости плазмы в направлении геомагнитного поля потенциальные флуктуации электрического поля *закорачиваются*, что позволяет рассматривать силовые линии стационарного магнитного поля эквипотенциальными, а возмущения плотности плазмы двухмерными — бесконечно вытянутыми вдоль его силовых линий [1]. Однако согласно данным, полученным при радиопросвечивании ионосферы сигналами искусственных спутников Земли (ИСЗ), степень вытянутости неоднородностей километровых масштабов в направлении геомагнитного поля в естественных условиях [2] и при воздействии на ионосферу мощного коротковолнового (КВ) радиоизлучения [3] не соответствует условиям применимости теории потенциальных флуктуаций плазмы. Измерения мелкомасштабных электрических полей, сопровождающих возмущения плотности плазмы, полученные с космических аппаратов в ионосфере и магнитосфере Земли (*in situ*), показывают, что их поляризация строго ортогональна внешнему магнитному полю [4]. Последнее позволяет предположить, что мелкомасштабные электрические поля имеют индукционную природу.

Как известно, в приближении одножидкостной магнитной гидродинамики (МГД) в идеальной плазме присутствие индукционного электрического поля приводит к дрейфу плазмы в направлении, ортогональном внешнему однородному статическому магнитному полю, выполнению условия *вмороженности* плазмы в силовые линии магнитного поля и образованию волн Альфвена [5]. В приближении двухжидкостной (МГД) в холодной плазме могут развиваться дрейфовые МГД-волны, которые описываются параболическим волновым уравнением и имеют круговую поляризацию. Наличие дрейфовых МГД-волн может приводить в ионосфере и магнитосфере Земли к развитию гиротропной — вращательно неинвариантной турбулентности плазмы [6].

*Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава,
аспирантов и студентов*

Возможность генерации вихревых квазистатических магнитных полей во вращающейся проводящей жидкости впервые была предложена Лармором [7] и получила развитие как теория магнитного динамо [8]. Показано, что для генерации таких полей необходимыми условиями являются: дифференциальное вращения проводящей жидкости и антисимметрия возмущений по отношению к направлению возбуждаемого магнитного поля [9]. Существующие противоречия между электромагнитным и потенциальным приближениями при описании генерации возмущений плотности плазмы в верхней ионосфере могут быть устранены в приближении двухжидкостной магнитной гидродинамики (МГД) при условии, что мелкомасштабные индукционные электрические поля образуются вследствие эффекта Холла, возникающего при протекании квазистатического тока в направлении, ортогональном внешнему стационарному магнитному полю.

Низкочастотные возмущения плазмы в F-слое ионосферы описываются системой уравнений Максвелла, в которых пренебрегается током смещения ($\partial \mathbf{E} / \partial t = 0$) и системой квазигидродинамических (КГД) уравнений

$$\begin{aligned} \partial \mathbf{B} / \partial t &= -c \operatorname{rot} \mathbf{E}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{B} &= 4\pi \mathbf{j} / c; \\ \partial n_\alpha / \partial t + \operatorname{div} n_\alpha &= 0, \\ m_\alpha \partial \mathbf{v}_\alpha / \partial t &= \pm e \mathbf{E} \pm e [\mathbf{v}_\alpha \times \mathbf{B}] - \nabla p_\alpha / n_\alpha - \frac{v_{ei} m_e}{e n_\alpha} \mathbf{j}, \\ \operatorname{div} \mathbf{E} &= 4\pi (n_i - n_e), \end{aligned}$$

для ионов индекс $\alpha = i$, для электронов $\alpha = e$. Ионосферная плазма является низкотемпературной (газокинетическое давление много меньше давления (B_0) постоянного магнитного поля $8\pi n (T_e + T_i) / B_0^2 \approx 10^{-5}$ и сильно замагниченной ($v_{ei} / \omega_{Be} \approx 10^{-4}$) проводящей средой. Здесь $\omega_{Be} \approx 10^7$ (с⁻¹) – гирочастота электронов, $v_{ei} \approx (3 \cdot 10^2 - 10^3)$ (с⁻⁴) – частота электрон-ионных соударений. Концентрации электронов и ионов приблизительно совпадают при выполнении условия квазинейтральности $|n_e - n_i| / n \sim r_D^2 / l^2$, где $r_D = \sqrt{T_e / 4\pi n e^2} \approx 1$ (см) – радиус Дебая, l – масштаб неоднородностей плазмы.

В приближении одножидкостной МГД в плазме распространяется низкочастотная волна Альфвена (см. [5]), которая подчиняется гиперболическому волновому уравнению. Фазовая скорость волны равна $v_A = (c / n_A) \sin \theta = B_0 \sin \theta / \sqrt{4\pi n m_i} \approx (10^7 - 10^8)$ (см/с) ее время затухания $\tau_A = 1 / k^2 D_B$ определяет коэффициент диффузии магнитного $D_B = c^2 / 4\pi \sigma \approx (1 - 3) \cdot 10^8$ (см² / с). Здесь введены следующие обозначения: $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число, θ – угол между направлением волнового вектора \mathbf{k} и нормалью к полю \mathbf{B}_0 . $n_A \approx (3 - 10) \cdot 10^2$ – показатель преломления, $\sigma \approx 10^{12}$ (с⁻¹) – продольная проводимость плазмы, c – скорость света. Волна Альфвена не содержит возмущений электронной концентрации и распространяется преимущественно в направлении силовых линий геомагнитного поля ($\sin \theta \leq 1$). Вследствие достаточно сильного затухания в условиях ионосферы она может содержать только крупномасштабные возмущения электромагнитных (ЭМ) полей $l \geq (10^6 - 10^7)$ (см). Взаимодействие волны с ионосферной плазмой может иметь резонансный характер, при котором она отражается от магнитосопреженных областей ионосферы [11].

В приближении двухжидкостной МГД квазистатическое электрическое поле находится из стационарного уравнения движения для электронной компоненты (обобщенный закон Ома) [12]

$$T_e \nabla n = -en\mathbf{E} - [\mathbf{j}_e \times \mathbf{B}_0] / c,$$

из которого следует выражение для индукционного электрического поля

$$\mathbf{E}'_\perp = [\mathbf{j} \times \mathbf{B}_0] / (enc) = (T_e + T_i) \nabla n / (en).$$

Поле \mathbf{E}'_\perp возникает в локальной (лагранжевой) системе отсчета и связано с полем в лабораторной (эйлеровой) системе отсчета преобразованием Лоренца

$E'_{\perp} = E_{\perp} + [v \times B_0]/c$, где $v = v_i = v_e$ – скорость дрейфа плазмы
 $v = c[E_{\perp} \times B_0]/B_0^2$.

Суммарное потенциальное и индукционное электрическое поле ($E = -\nabla\varphi + E'_{\perp}$) приводит к установлению амбиполярного режима диффузии плазмы, которая описывается анизотропным диффузионным уравнением с коэффициентом поперечным к магнитному полю диффузии $D_a = (T_e + T_i)v_{ei}/(m_e \omega_{Be}^2) \approx (1 - 3) 10^3$ (см²/с). Продольный коэффициент диффузии в полностью ионизованной плазме строго не определен, но, как показывают оценки в [13], при наличии волновых возмущений он может быть порядка $D_B \approx (1 - 3) \cdot 10^8$ (см²/с).

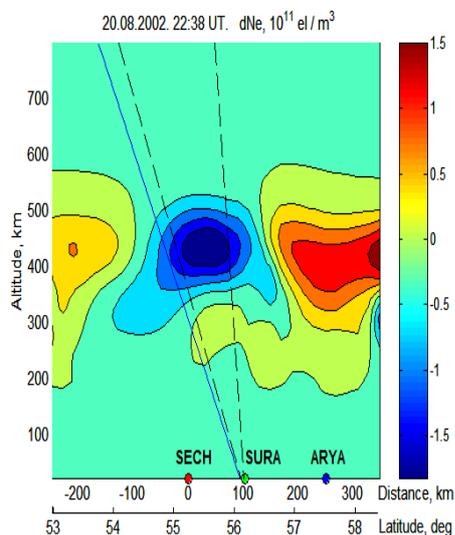
При воздействии мощного КВ радиоизлучения в плазме F-слое ионосферы может возбуждаться дрейфовая МГД-волна, которая описывается параболическим волновым уравнением (напомним, что волна Альфвена описывалась гиперболическим уравнением) и содержит возмущения электронной концентрации с поперечными масштабами $l > r_D$ и с частотой

$$\omega_d = c(T_e + T_i)k_{\perp}^2/(2eB_0), \quad \text{причем } \omega_d = \text{rot } v/2,$$

где v – гидродинамическая скорость возмущений плотности плазмы, угол $\theta = l_{\perp}/l_{\parallel} \approx (10^{-1} - 10^{-3})$ определяет степень вытянутости возмущений в направлении регулярного магнитного поля B_0 . Фазовая и групповая скорости дрейфовой МГД-волны составляют $v_{ph} = \omega_d/k$, $v_g = 2 v_{ph} \cdot (k/k)$, причем v_g направлена вдоль волнового вектора k почти ортогонально силовым линиям внешнего магнитного поля. Наличие дрейфовой МГД-волны дает возможность объяснить доплеровское уширение спектров, наблюдавшееся при диагностике искусственной ионосферной турбулентности методами ракурсного КВ рассеяния [14-16]. Данное уширение содержит узкополосную компоненту, за которую ответственны неоднородности с поперечными масштабами, большими длинами диагностической волны $l_{\perp} \geq \lambda_0 \approx (10 - 20)$ м, и широкополосную компоненту, за которую ответственны неоднородности с масштабами $l_{\perp} \leq \lambda_0$. Дисперсионное уравнение дрейфовой МГД-волны совпадает с однородным уравнением Шредингера, описывающим волновую функцию плотности вероятности распределения частиц, в котором роль постоянной Планка играет момент импульса, вращающегося в магнитном поле иона $L_i = (T_e + T_i)/\omega_{Bi}$. Данная волна (частоты ω) имеет круговую поляризацию и отличную от нуля плотность спиральности (*helicity*) $h = (\omega \cdot \text{rot } \omega) \propto k_{\parallel} |\omega_D|^2$, в то время как альфвеновская волна является линейно поляризованной. МГД-волны в ионосферной плазме являются независимыми, так как низкочастотные токи, вызывающие возмущения ЭМ полей имеют полоидальную структуру в альфвеновской и тороидальную структуру в МГД-дрейфовой волнах.

Особенностью, обнаруженной при релаксации ракурсных КВ сигналов, явился эффект *эхо-рассеяния*, состоящий в наличии квазипериодических всплесков у сигналов ракурсного КВ рассеяния при релаксации искусственных неоднородностей с периодом повторения ($T \approx 20 - 40$) с. [10, 15]. Первоначально попытка дать объяснение этому явлению состояла в предположении, что источником таких возмущения являются альфвеновские волны, генерируемые импульсом, возникающим при выключении мощного нагревного стенда, которые распространяются в плазме ионосферы между магнитосопряженными точками [11], причем они имеют характерное время повторения порядка T , наблюдавшегося в экспериментах. Однако вследствие достаточно большого значения коэффициента диффузии альфвеновских волн, последние не могут содержать возмущения метровых масштабов, ответственные за сигналы ракурсного КВ рассеяния.

Возможное решение этой задачи состоит в поиске механизма взаимодействия электромагнитных крупномасштабных и мелкомасштабных полей, генерируемых в приближениях одножидкостной и двухжидкостной МГД. На рис.1 и рис. 2 приведены примеры таких возмущений, полученные при радиопросвечивании возмущенной области ионосферы сигналами орбитального ИСЗ на когерентных частотах 150 МГц и 400 МГц. Сигналы принимались в трех пространственно разнесенных пунктах Нижегородской



области: п. Арья, п. Васильсурск, п. Сеченово, расположенных вдоль траектории ИСЗ. Нагрев ионосферы осуществлялся мощным КВ стандом «Сура» вблизи п. Васильсурск. На рис. 1 приведена радиотомограмма возмущенной области [17]. Как видно из рисунка, возмущение отвечающее ширине диаграммы направленности станда на уровне F-слоя ионосферы составляет порядка 100-200 км и имеет отрицательный характер $\Delta n < 0$. Вместе с тем на рисунке, представленном ниже, приведены сцинтилляции того же сигнала на частоте 150 МГц, вызванные неоднородностями плазмы с поперечными к геомагнитному полю масштабами 0.1-1.0 км, которые находятся внутри крупномасштабной области возмущения, и принимались независимо в трех пунктах наблюдений [3]. Если предположить, что

крупномасштабные и мелкомасштабные электромагнитные МГД-поля связанные с генерацией альфвеновских и МГД-дрейфовых волн взаимодействуют, то возможен перенос этих возмущений

Рис. 1

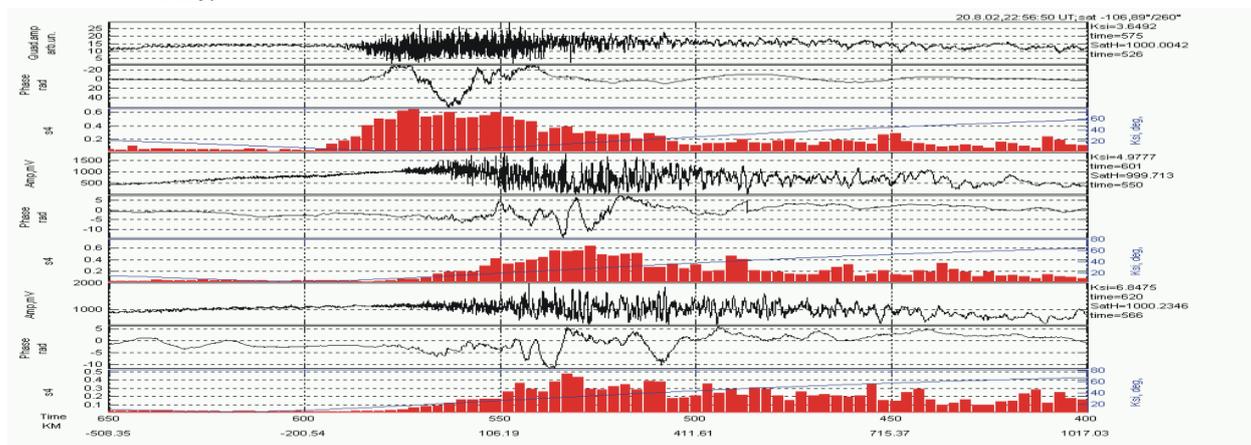


Рис. 2

вдоль силовых линий геомагнитного поля и возвращения их в исходную область после отражения от магнитосопреженной точки ионосферы.

Список литературы

- [1]. Kelley M. The Earth's ionosphere plasma physics and electrodynamics.//International geophysics series. 1989. V.43. Academic press.
- [2]. Erukhimov L.M., Kosolapenko V.I., Lerner A.M., Myasnikov E.N. The spectral form of small-scale plasma turbulence in the auroral ionosphere. Planet. Space Sci. 1981. V.29. N 9, P. 931-933.
- [3]. Мясников Е.Н., Муравьёва Н.В. Характеристики пространственного спектра неоднородностей плазмы, возбуждаемых на средних широтах мощным стандом СУРА. Изв. высших уч. зав. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 8. С. 722-730.
- [4]. Temerin M. The polarization, frequency and wavelength of high-latitude turbulence. JGR 1978. V. 83. P.2609
- [5]. Alfven H. On the existence of electromagnetic-hydrodynamic waves. Arkiv. f. Mat. Astron. Fysic.1942.29 B. N.2, (7 pp.)
- [6]. Мясников Е.Н. Международная конференция МСС-14 Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность, 24-27 ноября 2014. Сборник трудов. С 328-333.

- [7]. Larmor J. How cold the rotating body such as the Sun become a magnet. Rep. Brit. Assoc. Adv. Sci. 1919. V. 159.
- [8]. Попова Е.П. Современные результаты асимптотических исследований моделей динамо. УФН 2016.
- [9]. Моффат Г. Возбуждение магнитного поля в проводящей среде. М.; Мир 1980.
- [10]. Ямпольский Ю.М. «Эхо-рассеяние» КВ сигналов на искусственной ионосферной турбулентности. Изв. вузов Радиопизика Т. 32, N 4. С. 512-521.
- [11]. Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альвеновский резонатор. Геомагнетизм и аэрномия, 1981. Т. 21, N 5. С. 610.
- [12]. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. - М. Наука 1980, 303 с.
- [13]. Заборонкова Т.М., Мясников Е.Н. Диффузия плазмы в приближении двухжидкостной магнитной гидродинамики. Физика плазмы. 2017 (в печати).
- [14]. Koloskov A.V., Laser T.B., Yampolski Y.M., Beley V.S. HF pump-induced large-scale radial drift of small-scale magnetic field-aligned density striations. J. Geophys. Res. 2002. V.107, N.A7, 10.1029/2001JA000154.
- [15]. Авдеев В.С., Белей В.С., Беленов А.Ф., Галушко. В.Г., Ерухимов Л.М., Мясников Е.Н., Пономаренко П.В., Сергеев Е.Н., Синицын Е.Г., Ямпольский Ю.М., Ярыгин А.П. Обзор результатов рассеяния коротких волн искусственной ионосферной турбулентностью, полученные с помощью фазированной решетки УТР-2. Изв. вузов Радиопизика Т. 37, N 4. С. 479-492.
- [16]. Yampolski Y.M., Beley V.S., Kashceev S.B., Koloskov A.V., Somov V. G., Hyssel D.L., Isham B., Kelley M.C. Bistatic HF radar diagnostics induced field-aligned irregularities. JGR. V. 102. NO A4. P 7461-7467, APRIL 1, 1997.
- [17]. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Gurevich A.V., Zybin K.P., Frolov V.L., Myasnikov E.N., Muravieva N.V., Carlson H.C. Radio tomography and scintillation studies of ionospheric electron density modifications caused by a powerful HF-wave and magnetic zenith effect at mid latitudes. [Physics Letters A](#). 2004. T. 325. № 5-6. С. 381-388.

MGD-WAVE PROPAGATING UNDER CONDITION OF THE IRREGULARITIES DIFFUSION OF THE UPPER IONOSPHERE

T.M. Zaboronkova and E.N. Myasnikov

Key words: magnetohydrodynamics (MHD), MHD-waves in the ionosphere plasma, "Sura" heating facility, echo-scattering effect.

The experimental data of the relaxation of the large-scale and small-scale electron density irregularities excited by HF powerful "Sura" heating facility into the F-layer of the ionosphere are discussed. Interpretation the echo-scattering effect which is observed in Bragg-scattering experiments of HF diagnostic radio signal is proposed.