



УДК 533.951

Мясников Евгений Николаевич, доцент, д.ф.-м.н. профессор кафедры физики ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования университет водного транспорта, 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

ДРЕЙФОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

Ключевые слова: ионосфера, неоднородная структура верхней ионосферы, дрейфовая неустойчивость магнитоактивной плазмы.

Аннотация. В приближении двухжидкостной магнитной гидродинамики рассмотрена неустойчивость неоднородной магнитоактивной плазмы. Показано, что в экваториальной ионосфере Земли данная неустойчивость может привести к образованию неоднородностей, вытянутых в направлении геомагнитного поля и возникающих в областях резко пониженной электронной концентрации.

Низкочастотные магнитогидродинамические (МГД) неустойчивости могут описывать достаточно широкий класс явлений, возникающих в магнитоактивной плазме, среди которых значительный интерес представляют те из них, которые могут развиваться в ионосфере Земли и приводить к образованию ее неоднородной структуры. Такими являются градиентно-дрейфовые неустойчивости, возникающие при наличии крупномасштабных градиентов плотности плазмы и квазистатических флуктуаций электрических и магнитных полей. Измерения, выполненные с борта космических аппаратов (*in situ*), показывают, что данные поля ориентированы строго ортогонально к направлению внешнего геомагнитного поля \mathbf{B}_0 . Экспериментальные данные также свидетельствуют о генерации мелкомасштабных квазистатических электромагнитных полей, приводящих к крупномасштабным вихревым движениям плазмы [1].

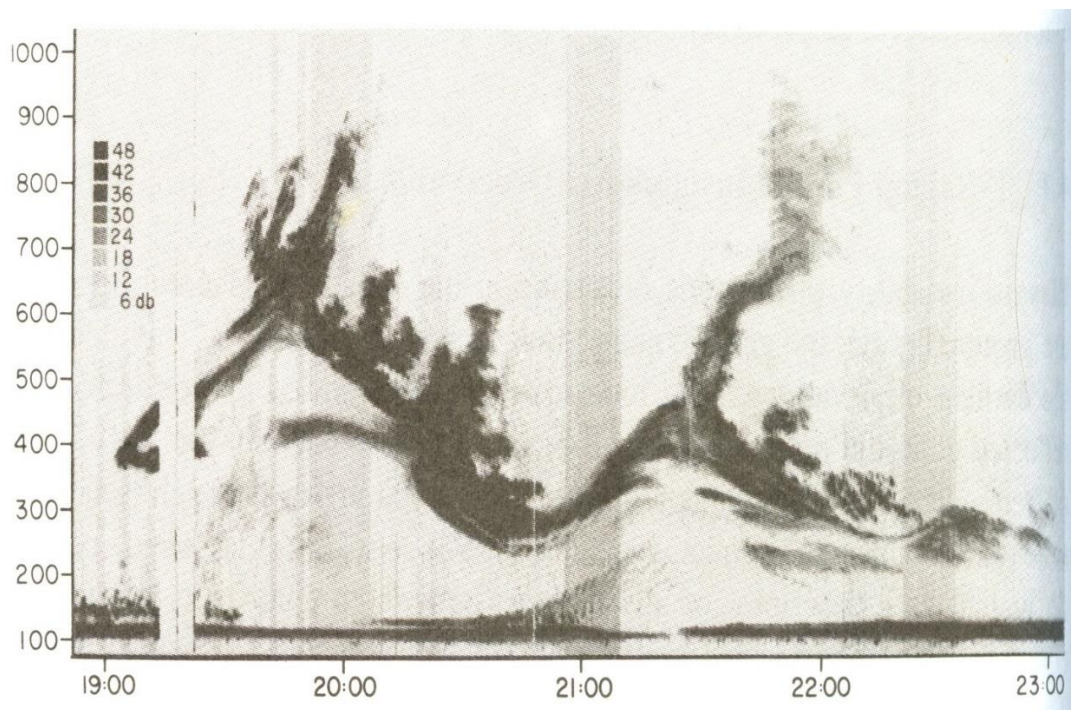
На широтах геомагнитного экватора неоднородности плазмы возникают, как правило, в вечерних условиях после прохождения на высоте верхней ионосферы солнечного терминатора, что сопровождается резким увеличением амплитуды флуктуаций электронной концентрации. Конвективные неустойчивости неоднородной плазмы, возникающие при наличии крупномасштабных электрических полей \mathbf{E}_0 и приводящие к дрейфу плазмы в скрещенном направлении со скоростью $\mathbf{V}_0 = [\mathbf{E}_0 \mathbf{B}_0] / B_0^2$, могут привести к росту неоднородностей на фоне крупномасштабного градиента электронной концентрации. Одна из таких неустойчивостей градиентно-дрейфовая (ГД) связана с проникновением более тяжелой жидкости, например, в гравитационном поле Земли, в более легкую. Однако в ионосферной плазме более тяжелыми являются металлические ионы, возникающие на высотах примерно 100-150 км при попадании и метеоритов в атмосферу, которые обнаруживают в областях с обедненной концентрацией плазмы на высотах до 1000 км. В соответствие с экспериментальными данными и теоретическими результатами, в основе которых лежит представление о потенциальности

мелкомасштабных поляризованных электрических полей дают основание для поиска решений в приближении двухжидкостной магнитной гидродинамики (МГД) [2].

Рассмотрим геометрию, при которой регулярное магнитное поле направлено вдоль оси z в плоскости геомагнитного экватора, ось x направлена вертикально вверх, а ось y – в горизонтальной плоскости. Будем считать, что в направлении оси y в плазме протекает крупномасштабный ток плотностью \mathbf{j}_{0y} , который замыкается в плоскости магнитного меридиана через направление z – магнитного поля \mathbf{V}_0 . Обедненная область плазмы образуется в направлении y в результате того, что заряженные частицы (электроны и ионы) движутся в противоположных направлениях.

Индукционное электрическое поле образуется в направлении, ортогональном \mathbf{V}_0 , при наличии резкого градиента электронной концентрации, возникающего при заходе Солнца, которое имеет две компоненты \mathbf{E}_{0x} и \mathbf{E}_{0y} , первая из них отвечает за дрейф плазмы в горизонтальном направлении со скоростью $\mathbf{V}_{0y} = -\mathbf{E}_{0x}/V_0$, а вторая – в вертикальном со скоростью $\mathbf{V}_{0x} = \mathbf{E}_{0y}/V_0$, причем эти скорости резко возрастают в областях с концентрацией $n \ll n_0$, где n_0 – концентрация невозмущенной фоновой плазмы. Если дополнительно предположить, что последняя из них переносит плазму в направлении внешней ионосферы, то становится понятным почему более тяжелые металлические ионы, образующиеся в нижней ионосфере перемещаются вверх. Данную систему уравнений можно рассматривать в качестве условия квазистатического равновесия плазмы в двухжидкостном МГД-приближении.

Градиентно-дрейфовая ГД неустойчивость с инкрементом $\gamma = V_0 / L_n$, может возникнуть в результате дрейфа магнитоактивной плазмы в скрещенных $\mathbf{V}_0 = [\mathbf{E}_0 \mathbf{V}_0]/V_0^2$ полях, где L_n – масштаб возмущения концентрации плазмы [3.]. При дальнейшем развитии ГД-неустойчивости возможна генерация дрейфовых МГД-волн, которые возникают только в отрицательных возмущениях плотности плазмы и приводят к рассеянию радиоволн в диапазоне коротковолновых (КВ) и ультракоротковолновых (УКВ) длин радиоволн [4.]. Такие области занимают масштабы от нескольких тысяч километров в направлении \mathbf{V}_0 и сотен километров в ортогональном ему плоскости и образованием ``пузырей'' (*bubbles*), в которых резко понижено значение электронной концентрации. Они распространяются в верхнюю ионосферу со скоростями порядка $(1-2) \cdot 10^2$ м/с до высот более тысячи километров. На рис. 1 приведена картина рассеяния радиоволн неоднородностями с поперечными к геомагнитному масштабам порядка 3 м, полученная при вертикальной зондировании возмущенной области ионосферы в Пуэрто-Рико (геомагнитный экватор). Это явление может быть сопоставимым с образованием протуберанцев в плазме солнечной короны, приводящим к ее выбросам на большие высоты (см. [4], p. 114).



Список литературы:

- [1.] Temerin M. Polarization of high latitude turbulence as determined by analysis of data from the OV1-17 satellite. J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 5935.
- [3.] Мясников Е.Н. Дрейфовая волна в двухжидкостной магнитоактивной плазме. Международная конференция МСС-14 Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность 24-27 ноября 2014г. Сборник трудов. С. 328-333.
- [3.] Dungey J.F. Convective diffusion in the equatorial F-region, 1956. J. Atmos. Terr. Phys. V.9. P. 304.
- [4.] Kelley M. The Earth's ionosphere plasma physics and electrodynamics. International geophysics series. Academic press, V. 43. 1989. P. 487.

DRIFT INSTABILITY OF AN INHOMOGENEOUS PLASMA OF THE TOPSIDE IONOSPHERE

Evgeny N. Myasnikov

Key words: ionosphere, non-uniform structure of the topside ionosphere, the drift instability of a magnetized plasma.

Annotation. The instability of inhomogeneous magnetized plasma is considered in the approximation of two-fluid magnetic hydrodynamics. It is shown that in the equatorial ionosphere of the Earth this instability can lead to the formation of irregularities of plasma elongated in the direction of the geomagnetic field and occurring in areas of sharply reduced electron concentration