

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ПРОВОДИМОСТИ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ И ТОКОВ

Б.Г. Гаврилов, Е.С. Хлыбов, Д.Б. Собянин, Д.В. Егоров

INVESTIGATIONS OF THE INFLUENCE OF LOCAL CONDUCTIVITY IN THE ARTIFICIAL LOWER IONOSPHERE ON DISTRIBUTION OF THE IONOSPHERE PLASMA DENSITY AND CURRENTS

B.G. Gavrilov, D.B. Sobyenin, E. S. Khlybov

Одной из задач геофизики и физики ионосферы является изучение ионосферной плазмы и токов, а также механизмов, влияющих на их распределение. В реальной ионосфере эти процессы исследуются с применением спутниковых измерений и активных экспериментов по искусственной модификации ионосферы. В статье описываются лабораторные эксперименты, в которых исследуется совокупность взаимосвязанных событий (генерация плазменного потока, его эволюция в магнитном поле, генерация продольных токов, развитие неустойчивостей в плазменных и токовых слоях, появление продольных электрических полей). Схема лабораторной установки качественно воспроизводит ионосферно-магнитосферную токовую систему и позволяет изучать влияние локального изменения проводимости модельной нижней ионосферы на распределение ионосферной плазмы и токов.

One of the purposes of geophysics and ionospheres physics is an investigation of ionospheric plasma, currents and physical mechanisms responsible for distribution of this parameters. In the real ionosphere these processes are investigated with using of satellite measurements and active experiments with artificial modification of ionosphere. In this paper described laboratory experiments and investigations of couple of connected actions (plasma current generation, its evolution in the magnetic field, generation of the FAC, evolution of the perturbations in the plasma and current layers, rising of magnetic field aligned electrical field). Laboratory stand schema qualitatively reproduce ionospheres magnetosphere currents system and permit us investigate the influence of local conductivity in the artificial lower ionosphere on distribution of the ionosphere plasma density and currents.

Статья посвящена исследованием эффектов, которые могут возникать при естественных и искусственных воздействиях на нижние слои ионосферы, приводящих к локальному изменению электронной температуры и как следствие к изменению проводимости в слоях замыкания продольных токов.

Известно, что плазма, движущаяся в магнитном поле Земли, вызывает возникновение или изменение магнитосферно-ионосферных токовых систем. Токи текут вдоль магнитного поля и замыкаются в нижней ионосфере. Воздействие на проводимость нижней ионосферы приводит к изменению параметров токовой системы и влияет на динамику генерирующей продольные токи плазмы.

Были получены многочисленные экспериментальные данные и разработаны физические модели, описывающие авроральные процессы. Они позволяют успешно прогнозировать многие явления в магнитосфере, ионосфере, термосфере и атмосфере. Особенно это касается крупномасштабных событий типа геомагнитных бурь и суббурь. В тоже время, явления относительно малого масштаба с характерными размерами 10 м – 10 км, которые могут влиять на радиосвязь и работу навигационных систем, предсказать трудно, так как адекватных физических моделей, описывающих поведение таких областей, сегодня не существует. Это связано в частности со сложностью получения достаточно полных измерительных данных в реальных магнитосфере и ионосфере. В этих условиях, лабораторное моделирование физических механизмов, ответственных за мелкомасштабные явления в магнитосферно-ионосферной системе могут дать важные результаты.

Исследование влияния изменения проводимости в нижней ионосфере на распределение плотности ионосферной плазмы, токов и потоков заряженных частиц проводилось в лабораторном эксперименте на качественном уровне, позволяющем изучать ос-

новные физические механизмы, ответственные за связь различных параметров плазмы и токовой цепи. Потоки ионосферной плазмы моделируются генерацией плотной плазменной струи, распространяющейся перпендикулярно магнитному полю над искусственной нижней ионосферой, в которой замыкаются генерируемые плазменным потоком продольные токи. Над проводящей искусственной нижней ионосферой создаются области пониженной проводимости. В экспериментах варьируются размеры, конфигурация и количество областей аномальной проводимости. В части экспериментов изменяются внешние условия, такие как магнитное поле и энергия плазменной струи.

Лабораторная установка «Факел», на которой проводились исследования представляет из себя цилиндрическую вакуумную камеру в торце которой расположен коаксиальный разрядник. Разрядник генерирует сгусток плотной плазмы распространяющийся в вакууме перпендикулярно магнитному полю. Линии индукции магнитного поля перпендикулярны хорошо проводящей медной пластине. Сгусток плазмы распространяется в магнитном поле над медной пластиной.

Так же как и в реальных ионосферных условиях, над хорошо проводящей нижней ионосферой, роль которой в экспериментах выполняет медная пластина, движется плазма. Для создания локальных областей пониженной проводимости используются диэлектрические диски или пластины, размещаемые над модельной нижней ионосферой.

Плотность плазменного потока, электрическое поле и токи регистрируются зондами Ленгмюра, датчиками электрического поля и двухкомпонентными магнитометрами [1–3].

Общая картина явления наблюдается с использованием скоростного электроннооптического фоторе-

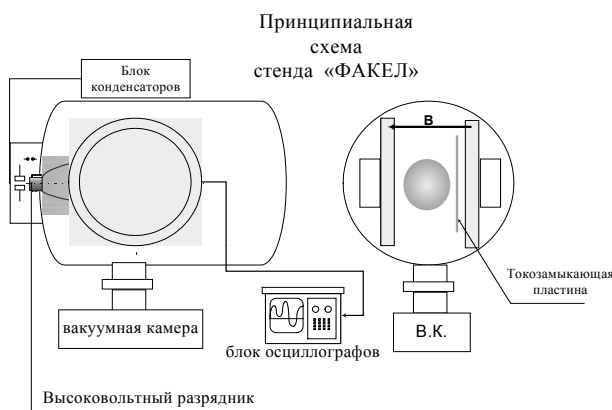


Рис. 1. Схема лабораторного стенда ФАКЕЛ.

гистратора. Полученные фоторегистрограммы показали, что в присутствии сильного магнитного поля над областями пониженной проводимости свечимость плазмы падает, что связано с понижением ее концентрации в магнитной силовой трубке, проходящей через область пониженной проводимости. Прямые измерения показали, что плотность плазмы над областью с пониженной проводимостью в несколько раз ниже, чем в плазме над невозмущенной ионосферой.

На рис. 2 изображены кривые концентрации в трех точках измерения.

До пластины, концентрации ведет себя типично для струи плазмы, распространяющейся в магнитном поле (фиолетовая кривая рис. 2).

Над пластиной концентрация, как и ожидалось, значительно ниже (синяя кривая рис. 2). На краях области пониженной концентрации наблюдаются два максимума, что свидетельствует о появлении плазменной каверны или пузыря. Сечение которого было получено непосредственным измерением

Вопреки ожидаемой в третьей точке измерения за диэлектриком обычной кривой концентрации, мы обнаружили «эффект памяти плазмы», который заключается в том, что плотность потока плазмы сохраняет информацию о том, что поток проходил над областью пониженной проводимости. (Красная кривая рис. 2).

Для объяснения этого явления был предложен его механизм, который связывает уменьшение концентрации плазмы с ростом ее скорости в результате возрастания электрического поля в плазменной струе. Рост электрического поля, в свою очередь, мо-

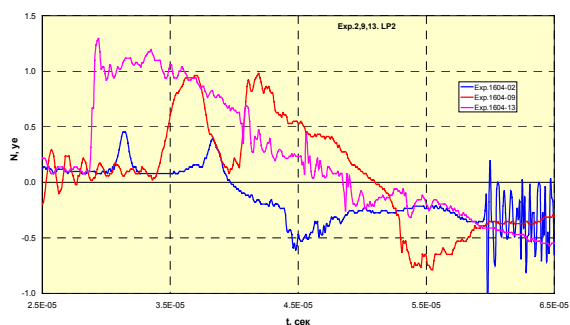


Рис. 2. Измерение плотности плазмы в опытах над диэлектриком (синяя кривая), за диэлектриком (красная кривая) и перед диэлектриком (фиолетовая кривая).

жет быть обусловлен снижением плотности продольных токов из-за уменьшения проводимости в цепи их замыкания в нижней ионосфере.

Для проверки предложенного механизма были проведены одновременные измерения плотности плазмы и поляризованного электрического поля в струе. Эффективность влияния проводимости в нижней ионосфере на плотность тока, электрическое поле и концентрацию плазмы должна существенно возрастать в том случае, если область уменьшенной проводимости перекрывает оба слоя продольных токов. Этот эффект был подтвержден в опыте, где диэлектрический диск был заменен на диэлектрическую пластину.

Из рис. 3 видно, что максимальное электрическое поле соответствует области над диэлектрическим диском, а измерения плотности плазмы в аналогичной области показывают минимум. Плотность плазмы и поляризованное электрическое поле изменяются в противофазе, что подтверждает версию о том, что изменение концентрации плазмы связано с изменением поляризованного электрического поля.

Одновременно в этих же экспериментах мы попытались промоделировать ситуацию, схожую с той, которая возникает во время экспериментов на нагревных стендах при модуляции мощности излучения. Эффект заключается в генерации низкочастотного электромагнитного поля за счет локального изменения плотности ионосферного тока в полярном электроджете, при воздействии на него мощного радиоизлучения с модулированной по времени амплитудой.

В лабораторных экспериментах нет возможности менять проводимость во времени, поэтому временная модуляция была заменена пространственной. Это стало возможным, так как в экспериментах плазменная струя, являющаяся генератором продольных токов, движется над поверхностью с циклически меняющейся проводимостью. В результате был получен тот же эффект, который наблюдается в ионосфере при модуляции тока полярного электроджета.

На рис. 4 показано магнитное поле (зеленая кривая), генерируемое холловской составляющей тока в токозамыкающей пластине. Время между максимума поля соответствует времени пролета фронта плазменной струи между двумя диэлектрическими полосами.

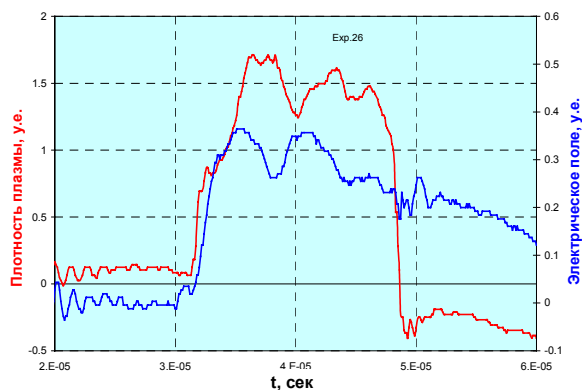


Рис. 3. Осциллограммы плотности плазмы (красная кривая) и поперечного электрического поля (синяя кривая), полученные в одном эксперименте при размещении датчиков над текстолитовой полосой.

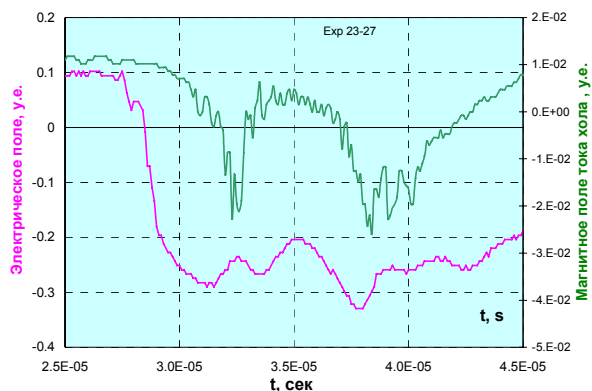


Рис. 4. Осциллограммы поперечного электрического поля (фиолетовая кривая) и магнитного поля холлового тока (зеленая кривая).

Таким образом, в экспериментах было показано, что плотность плазмы в магнитно-силовой трубке, опирающейся на область пониженной проводимости, уменьшается. Этот эффект связан с ростом дрейфовой скорости плазмы в результате роста электрического поля, вследствие уменьшения плотности продольного тока при изменении проводимости в цепи его замыкания.

Обнаружен эффект «памяти плазмы», который заключается в том, что область пониженной концентрации продолжает распространяться и над областями с нормальной проводимостью.

Пользуясь разработанной методикой, нам удалось смоделировать генерацию низкочастотного электромагнитного поля при движении плазмы над областями с циклически меняющейся проводимостью.

Нам представляется, что результаты проведенных экспериментов могут быть полезны для интерпретации ряда ионосферных эффектов, в том числе возникающих в экспериментах по радиочастотному нагреву ионосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gavrilov, B.G., R.E. Erlandson, Y.N. Kiselev et al. Dynamics of high energy plasma jet in the space: in situ experiment and laboratory simulation // *Adv. Space Res.* 1998. 21(5). P. 773–776.
2. Гаврилов Б.Г., Зецер Ю.И., Подгорный И.М., Собянин Д.Б. Экспериментальное исследование взаимодействия высокоскоростных потоков космической плазмы с ионосферой и магнитосферой земли // *Солнечно-земная физика.* 2002. Вып. 2. С. 171–172.
3. Sobyenin D.B., Gavrilov B.G., Podgorny I.M. Laboratory investigation of plasma jet interaction with transverse magnetic field // *Adv. Space Res.* 2002. 29(9). P. 1345–1349.
4. Хлыбов Е.С., Гаврилов Б.Г., Егоров Д.Е. Модельные исследования ионосферных токов, электрических полей и ускорений заряженных частиц // *Сборник трудов XLVII научной конференции МФТИ, секция геофизика сильных возмущений.*