

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОЙ РАДИОВОЛНЫ КВ-ДИАПАЗОНА НА ИОНОСФЕРНУЮ ПЛАЗМУ F-СЛОЯ

О.В. Мингалев, М.Н. Мельник, В.С. Мингалев

*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия*

**Аннотация.** Численно исследуется влияние стоячей мощной радиоволны КВ-диапазона на поведение ионосферной плазмы F-слоя. Для этого исследования используется математическая модель, разработанная ранее в Полярном геофизическом институте. Математическая модель основывается на численном решении методом крупных частиц системы уравнений Власова-Пуассона. Результаты численного моделирования показывают, что присутствие стоячей мощной радиоволны КВ-диапазона должно существенно влиять на поведение макроскопических скоростей электронов и положительных ионов, причем векторы упомянутых скоростей вращаются в каждой точке облучаемой области аналогично вектору мощной радиоволны.

### Введение

Во время экспериментов по искусственному нагреву ионосферы используются мощные короткие радиоволны (КВ), испускаемые наземными нагревными станциями. Эти мощные радиоволны вызывают в ионосфере протекание цепочки физических процессов, приводящих в конечном счете к образованию как крупномасштабной неоднородности, в которой электронная температура повышена, а концентрация понижена, так и к возникновению сверх мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации, вытянутых вдоль магнитного поля.

В работе [1] подробно описаны параметры вытянутых вдоль магнитного поля сверх мелкомасштабных неоднородностей, порождаемых мощной КВ. Согласно этой работе относительные отклонения электронной концентрации в этих неоднородностях могут достигать нескольких десятков процентов, а поперечные размеры этих неоднородностей составляют несколько дебаевских радиусов (не более 100). Образование таких сверх мелкомасштабных неоднородностей под действием мощных КВ численно моделировалось в работе [2]. Однако такие неоднородности могут возникать в ионосфере и в естественных условиях, а не только во время нагревных экспериментов [1].

Эволюция во времени именно таких вытянутых вдоль геомагнитного поля сверх мелкомасштабных неоднородностей исследовалась нами при помощи расчетов по математической модели, разработанной в Полярном геофизическом институте [3-7].

В настоящей работе при помощи упомянутой математической модели проводится исследование влияния мощной радиоволны КВ-диапазона на поведение ионосферной плазмы F-слоя в облучаемой радиоволной области в отсутствие неоднородностей.

### Математическая модель

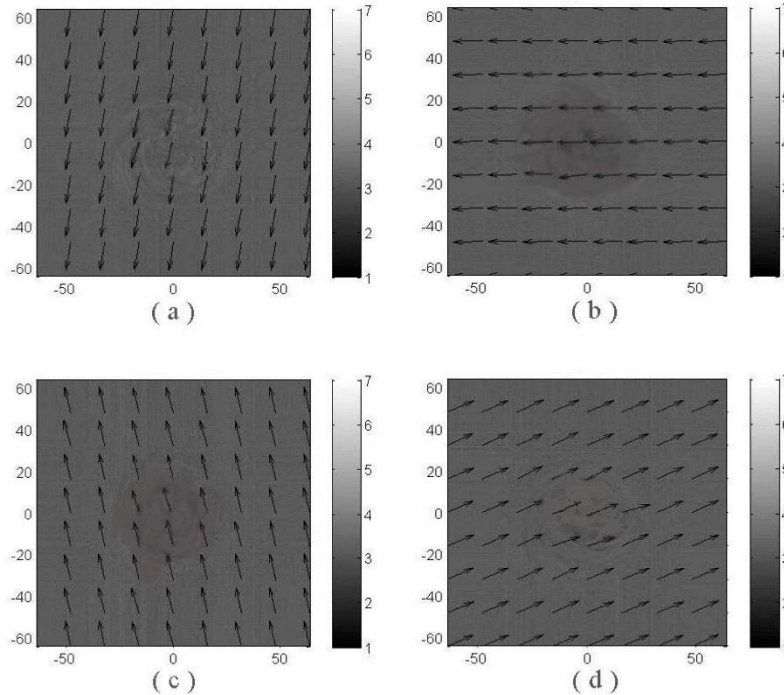
Для исследования влияния мощной радиоволны КВ-диапазона на поведение ионосферной плазмы F-слоя используется разработанная ранее в ПГИ численная модель, в которой предполагается, что плазма является разреженной смесью электронов и положительных ионов. Поскольку изначально предполагалось использовать численную модель для исследования эволюции во времени первоначально созданных неоднородностей, имеющих поперечные размеры порядка нескольких дебаевских радиусов, которые являются весьма малыми по сравнению с длинами свободного пробега электронов и ионов, то плазма считается бесстолкновительной.

Кинетические процессы в плазме описываются системой уравнений Власова-Пуассона, причем уравнения Власова описывают поведение функций распределения электронов и ионов, а уравнение Пуассона описывает самосогласованное электрическое поле в плазме. Внешнее магнитное поле считается постоянным и является задаваемым параметром модели. Поскольку сверх мелкомасштабные неоднородности являются сильно вытянутыми вдоль магнитного поля, то параметры плазмы внутри и вне их считаются слабо зависящими от продольной координаты. Поэтому исследуется зависимость плазменных параметров только от координат, перпендикулярных магнитному полю, т.е. задача считается пространственно 2-х мерной. В численной модели учитывается движение как электронов, так и ионов в ортогональной геомагнитному полю плоскости.

Для решения применяемой в модели системы уравнений Власова-Пуассона используется метод крупных частиц. Областью моделирования является квадрат со стороной, равной нескольким десяткам дебаевских радиусов. Подробное описание используемой математической модели можно найти в [3].

### Результаты расчетов и их обсуждение

Результаты расчетов, представляемые в настоящей работе, получены при значениях входных параметров модели, типичных для ночной ионосферы на высоте 300 км. В частности, равновесный период лэнгмюровских колебаний электронов  $\mathcal{G}_{pe}^0$  оказывается равным  $3.52 \cdot 10^{-7}$  с, дебаевский радиус  $\lambda_{De}^0 \approx 7.6$  мм, период циклотронных колебаний электронов  $\mathcal{G}_{ce}$  оказывается в 2.3 раза больше равновесного периода лэнгмюровских колебаний электронов ( $\mathcal{G}_{ce} \approx 2.3 \cdot \mathcal{G}_{pe}^0$ ). Средняя длина свободного пробега и среднее время свободного пробега электронов составляют, соответственно, 50 м и  $3.7 \cdot 10^{-4}$  с, причем последнее из указанных время в 1047 раз превышает  $\mathcal{G}_{pe}^0$ .



**Рисунок 1.** Пространственные распределения вектора гидродинамической скорости электронов в перпендикулярной магнитному полю плоскости на уровне пучности волны, рассчитанные в различные моменты:  $t = 5.2 \cdot \mathcal{G}_{pe}^0$  (а),  $t = 5.4 \cdot \mathcal{G}_{pe}^0$  (б),  $t = 5.6 \cdot \mathcal{G}_{pe}^0$  (в),  $t = 5.8 \cdot \mathcal{G}_{pe}^0$  (д) ( $\mathcal{G}_{pe}^0$  - равновесный период лэнгмюровских колебаний электронов). По горизонтальной ( $X$ ) и вертикальной ( $Y$ ) осям отложено расстояние от центра области моделирования, выраженное в дебаевских радиусах  $\lambda_{De}^0$ . Степень затемнения рисунков показывает величину скорости в км/сек.

При указанных значениях параметров плазмы нами были проведены расчеты эволюции функций распределения заряженных частиц и электрического поля в плазме для двух принципиально различающихся ситуаций.

В первой ситуации мощная КВ отсутствовала. Вторая ситуация соответствовала случаю, когда включалась мощная КВ, которая в течение пяти периодов лэнгмюровских колебаний электронов нарастала до максимальной величины и оставалась в дальнейшем равной этой величине. Мощная КВ считалась стоячей обыкновенной волной, имеющей частоту верхнегибридного резонанса. Вектор электрического поля волны лежал в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, в которой лежит и область моделирования. Вектор электрического поля мощной КВ вращается в перпендикулярной магнитному полю плоскости. Амплитуды ортогональных компонент электрического поля волны задавались одинаковыми и имеющими максимальные величины, равные 0,49 в/м на уровне пучности радиоволны, что вполне достижимо, например, для высокоширотного нагревного стенда в г. Тромсе (Норвегия).

Поскольку ионосферная плазма F-слоя является сильно замагниченной, то векторы гидродинамических скоростей электронов и положительных ионов также должны вращаться с частотой, равной частоте мощной

радиоволны, что подтверждают результаты расчетов (рис. 1). Однако оказалось, что величина скорости электронов достигала нескольких км/сек, в то время как величина скорости положительных ионов была на четыре порядка меньше на уровне пучности волны.

Расчеты показали, что в области моделирования, когда она находилась на уровнях узлов стоячей волны, рассчитываемые параметры вели себя так, как в случае, когда КВ-волна отсутствовала, в частности гидродинамические скорости заряженных частиц оставались близкими к нулю. Такие различия в поведении гидродинамических скоростей электронов и положительных ионов на близко расположенных уровнях (пучности и узлы отстоят друг от друга на половину длины мощной волны КВ-диапазона) должны приводить к нагреву ионосферной плазмы в области воздействия мощных КВ.

### **Заключение**

Методом математического моделирования проведено исследование влияния мощной радиоволны КВ-диапазона на поведение ионосферной плазмы F-слоя. Применена пространственно 2-х мерная математическая модель, разработанная в Полярном геофизическом институте, которая основана на решении методом крупных частиц системы уравнений Власова-Пуассона.

Расчеты показали, что в области моделирования, когда она находилась на уровнях пучностей и на уровнях узлов стоячей волны, совершенно по-разному вели себя гидродинамические скорости заряженных частиц (электронов и положительных ионов). На уровнях узлов эти скорости оставались близкими к нулю. А на уровнях пучностей векторы гидродинамических скоростей электронов и положительных ионов вращались с частотой, равной частоте мощной радиоволны. При этом величина скорости электронов существенно превышала величину скорости положительных ионов и достигала нескольких км/сек. Этот факт позволил нам высказать гипотезу о том, что обнаруженный эффект, наряду с другими известными механизмами, может приводить к локальному нагреву плазмы в области воздействия мощных радиоволн КВ-диапазона.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-01-00100.

### **Список литературы**

1. Wong, A. Y., Santoru, J., Darrow, C., Wang, L., and Roederer, J.G. Ionospheric cavitons and related nonlinear phenomena // *Radio Science*. V.18. P. 815-830. 1983.
2. Eliasson B., Stenflo L. Full-scale simulation study of the initial stage of ionospheric turbulence // *J. Geophys. Res.* V.113. № A2. P. 305. doi:10.1029/2007JA012837. 2008.
3. Мингалев О.В., Мингалев И.В., Мингалев В.С. Двумерное численное моделирование динамики мелкомасштабных неоднородностей в околоземной плазме // *Космические исследования*. Т. 44, № 5. С. 416–427. 2006.
4. Мингалев О.В., Мингалева Г.И., Мельник М.Н., Мингалев В.С. Численное моделирование поведения сверх мелкомасштабных неоднородностей в слое F ионосферы // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 50, №5. С. 671-682. 2010.
5. Mingalev, O.V., Mingaleva, G.I., Melnik, M.N., and Mingalev, V.S. Numerical simulation of the time evolution of small-scale irregularities in the F-layer ionospheric plasma // *International Journal of Geophysics*. Volume 2011, Article ID 353640, 8 pages, doi:10.1155/2011/353640. 2011.
6. Mingalev, O.V., Melnik, M.N., and Mingalev, V.S. Numerical modeling of the time evolution of super-small-scale irregularities in the near-Earth rarefied plasma // *International Journal of Geosciences*. V.6. P. 67-78. 2015.
7. Mingalev O.V., Melnik M.N., Mingalev V.S. A simulation study of the effect of powerful high-frequency radio waves on the behavior of super-small-scale irregularities in the F-layer ionospheric plasma // *World Journal of Research and Review*. V.3. No. 5. P. 01-09. 2016.