

*С. В. Мацевский, Л. В. Зинин*

## **РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО F-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ**

*Описаны результаты численных экспериментов по динамике ионосферных пузырей в экваториальной F-области. Исследована генерация пузырей гравитационными волнами. Изучен триггерный механизм генерации пузырей в F-слое облаками в E-слое. Рассмотрены влияния проводимости E-слоя на динамику пузырей. Показано, что в пузырях молекулярные ионы  $NO^+$  эффективно поднимаются на верхние высоты. Обоснована возможность изоляции пузырей на высотах выше максимума F-слоя. Представлены параметры теплового режима трехмерных пузырей. Исследована морфология системы множественных пузырей.*

*The results of numerical experiments of the dynamic ionospheric bubbles in the equatorial F-region are described. Generation bubbles by gravitational waves is investigated. A trigger mechanism of generation bubbles in F-layer by clouds in E-layer is studied. Influences of a conductivity of the E-layer on*



*dynamics of bubbles are considered. It is shown that in the bubbles the molecular ions  $\text{NO}^+$  effectively transported to the higher altitude. The possibility of the formation of isolated bubbles at the altitude above the maximum of F-layer is founded. Parameters of thermal mode of three-dimensional bubbles are presented. The morphology of a multi-bubble system are researched.*

**Ключевые слова:** моделирование, ионосфера, неустойчивость.

**Key words:** simulation, ionosphere, instability.

## 1. Введение

56

Проблема неоднородной структуры ионосферной плазмы — одна из ключевых в современной физике ионосферы [1, с. 3].

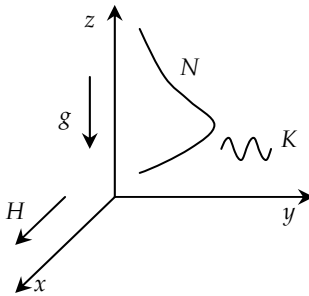


Рис. 1. Картина возникновения неоднородностей у геомагнитного экватора:  $g$  — ускорение свободного падения;  $H$  — геомагнитное поле;  $N$  — концентрация электронов;  $K$  — начальное возмущение

В приэкваториальной области F появление F-рассеяния — более частое событие, чем на умеренных широтах. В геометрическом отношении картина возникновения неоднородностей выглядит более простой (рис. 1). Эти обстоятельства способствовали тому, что основное внимание в теории F-рассеяния было уделено экваториальной ионосфере [1, с. 100].

При сильной вытянутости неоднородностей вдоль геомагнитного поля для экваториальной ионосферы после захода Солнца существенно влияние только неустойчивости Рэля — Тейлора (НРТ) [1, с. 103]. Поэтому здесь будет рассматриваться только эта неустойчивость.

При сильной вытянутости неоднородностей вдоль геомагнитного поля для экваториальной ионосферы после захода Солнца существенно влияние только неустойчивости Рэля — Тейлора (НРТ) [1, с. 103]. Поэтому здесь будет рассматриваться только эта неустойчивость.

Аналитическим и численным моделированием НРТ занимались многие авторы. Из многочисленных публикаций, посвященных этой теме, назовем здесь только две — [2] и [3]. По ним и по остальным работам из списка литературы можно легко найти все остальные, касающиеся данной области.

Для компьютерных экспериментов в экваториальной F-области использовалась иерархия многомерных нелинейных численных моделей, полученная путем последовательных упрощений из системы уравнений Максвелла и гидродинамических уравнений с учетом электромагнитных сил [4]. Основные моменты численного приближенного решения этих дифференциальных уравнений раскрыты там же.

Опишем основные результаты, полученные в ходе проведенных численных экспериментов. Как известно, следствием механизма действия НРТ в ионосферной плазме могут быть локальные понижения плотности непрерывной среды, так называемые пузыри, которые все быстрее поднимаются вверх, принимая поперек геомагнитного поля специфическую грибообразную форму [2; 3; 5]. Размеры таких пузырей относятся к среднемасштабным, характерная поперечная толщина ножки пузыря — несколько десятков километров.



## 2. Генерация ионосферных пузырей

При благоприятных для возникновения НРТ условиях ионосферные пузыри генерируются возникновением на нижнем склоне профиля электронной концентрации небольших градиентов плазмы (см. рис. 1). Это возможно как путем непосредственного внесения начальных неоднородностей в чувствительную для неустойчивости зону, так и опосредованным воздействием внешних для этой зоны факторов — искусственных и естественных.

Было изучено три механизма генерации ионосферных пузырей:

- 1) простое модельное внесение начальных неоднородностей;
- 2) прохождение через ионосферу гравитационной волны;
- 3) задание начальных неоднородностей в нижележащем E-слое ионосферы в стороне от экватора.

**1. Простое модельное непосредственное внесение начальных неоднородностей.** Оно естественным образом использовалось во всех численных экспериментах, где не надо было исследовать специальные механизмы запуска ионосферных пузырей [5–9]. Это снижало затрачиваемые расчетные ресурсы. Кроме того, задача исследования корреляции способов запуска механизма неустойчивости и параметров развития среднемасштабных пузырей не ставилась.

При положительном инкременте неустойчивости Рэлея — Тейлора ионосферные пузыри возникали при задании начальных неоднородностей любой величины. Чем больше была глубина начальной неоднородности, тем быстрее развивалась нелинейная стадия ионосферного пузыря [5–9]. Стандартный сценарий развития уединенного пузыря такой: сильно вытянутый по высоте и открытый снизу плазменный пузырь с депрессией концентрации в 1–2 порядка поднимается во внешнюю ионосферу в режиме с обострением, принимая специфическую поперечную грибообразную форму, что полностью соответствует аналитическому решению [2].

**2. Прохождение через ионосферу гравитационной волны.** Был изучен [10] процесс перераспределения ионосферной плазмы за счет движения нейтральных частиц, вызванного прохождением внутренней гравитационной волны (ВГВ) в верхней атмосфере. Чтобы при этом возникли неоднородности, необходим пространственный резонанс, связывающий волновой вектор ВГВ с вектором скорости плазменного дрейфа. Тогда амплитуды небольших ионосферных возмущений резко возрастают в нелинейном режиме, что и приводит к образованию ионосферных пузырей, если ионосфера в это время неустойчива для таких возмущений.

В начальный момент времени максимум электронной концентрации равен  $9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  и находился на высоте 380 км. Характерное время развития локальной НРТ составляло 170 с на высоте 320 км. Фоновая скорость нейтральной атмосферы была направлена горизонтально и равнялась 100 м/с; длина волны ВГВ — 200 км, ее профиль — одногорбая уединенная волна [10].

Расчеты, выполненные с нарушением пространственного резонанса, показали отсутствие возникновения пространственных структур.



При наличии резонанса расчеты показали, что зависимость времени генерации максимальной вертикальной скорости внутри пузыря от безразмерной амплитуды ВГВ строго логарифмическая с постоянным коэффициентом пропорциональности для разных численных экспериментов. Данный коэффициент оказался равен 350 с, что в два раза больше характерного времени развития локальной НРТ. Данный коэффициент естественно назвать *характерным временем развития нелокальной НРТ*. Этот параметр характеризует процесс развития НРТ в целом, тогда как локальный параметр — только на высоте 320 км [10].

Был также изучен каскадный механизм  $VGB \rightarrow$  *начальные неоднородности*  $\rightarrow$  *ионосферные пузыри*. На первой стадии  $VGB \rightarrow$  *начальные неоднородности* возникли слабые неоднородности вертикальной скорости плазмы, соответствующие слабым неоднородностям концентрации плазмы. Причина состоит в увлечении плазмы движением нейтральных частиц, носящим по высоте синусоидальный характер. Неоднородности располагались симметрично по обе стороны вертикальной оси ВГВ строго в шахматном порядке. В конце этой стадии происходит естественный отбор среди слабых неоднородностей: растут только те из них, которые попали в область положительного линейного инкремента НРТ. Более того, в этой области по горизонтали возникают новые неоднородности, что отражает процесс возникновения структуры вертикальных конвективных ячеек [10].

Рассмотрим вторую стадию *начальные неоднородности*  $\rightarrow$  *ионосферные пузыри*. Долготная протяженность пузыря приблизительно равна 50 км, то есть четверти длины ВГВ. Кроме того, оказалось, что количество сформировавшихся плазменных пузырей зависит от взаимного расположения зоны положительного инкремента НРТ и тех слабых неоднородностей, которые возникли в результате резонанса плазмы и ВГВ, поскольку при изменении начальной фазы ВГВ шахматная структура слабых неоднородностей сдвигается по высоте. Выявлено, что одиночный пузырь растет гораздо быстрее, чем два. При начальных фазах ВГВ  $-0,2\pi$  и  $0,8\pi$  образовались два одинаковых пузыря, то есть два пузыря, одинаково влияющих и тормозящих друг друга. При начальных фазах ВГВ  $-0,7\pi$  и  $0,3\pi$  образовался один пузырь с максимальной скоростью развития [10].

**3. Задание начальных неоднородностей в нижележащем E-слое ионосферы в стороне от экватора.** Возникает вопрос: а можно ли искусственно возбудить НРТ в экваториальном F-слое, причем использовать для этого не слишком мощные ракеты, не поднимающиеся до таких высот? Ответ положительный. Как известно, в случае возмущений с поперечным масштабом более 1 км электрические поля легко проникают из E- в F-область и наоборот. Появление зоны повышенной проводимости в E-слое приведет к образованию неоднородностей электрического поля вблизи нее. Проектируясь вдоль высокопроводящих эквипотенциальных силовых линий геомагнитного поля в F-область, они при благоприятных условиях могут породить ионосферные пузыри над магнитным экватором.



При численных экспериментах начальная неоднородность в E-области имела вид двух шаровых облаков повышенной электронной концентрации, расположенных на одной высоте и широте, что достаточно хорошо моделирует выброс двух облаков бария.

Расчеты показали [11], что задание в E-области зон повышенной проводимости привело к образованию в экваториальной F-области плазменных пузырей. Таким образом, имел место следующий каскадный механизм: *облака в E-области* → *начальные неоднородности в F-области* → *пузыри в F-области*.

Количество пузырей, возникших в F-области (два или три), зависит от расстояния между центрами облаков и их характерного радиуса. При расстояниях между облаками, меньших или равных двойному радиусу, развивались два пузыря, а при много больших — три. Скорость развития пузырей в F-слое не зависела от расстояния между начальными облаками в E-слое и слабо зависела от их высоты. Наибольшая скорость развития пузырей наблюдалась тогда, когда силовые линии, проходящие через центры облаков в E-слое, проходили на высоте максимума электронной концентрации в F-слое.

Варьирование характерного времени рассасывания облаков в E-слое — в пределах 300–900 с — не привело к изменению времени достижения фиксированной вертикальной скорости плазмы внутри пузырей в F-слое. Это говорит о том, что начальные неоднородности в F-слое, необходимые для запуска развития пузырей, успевают сформироваться за время, много меньшее 300 с.

Была выявлена функциональная зависимость между начальной интегральной проводимостью E-области и динамикой плазменных пузырей в F-области, а именно между логарифмом отношения приращения проводимости в центре облаков к фоновой проводимости в начальный момент времени и временем достижения фиксированной вертикальной скорости плазмы внутри пузырей. При малых значениях логарифма получена линейная зависимость с ненулевым коэффициентом между указанными двумя параметрами, при больших время достижения становится постоянным.

Насыщение указанной функциональной зависимости говорит о том, что существует *предел минимального конечного времени развития пузырей*. Причем чтобы попасть в интервал асимптотического притяжения этого времени, при фиксированном характерном радиусе облаков в E-области достаточно иметь их амплитуду не ниже определенного порога, и чем больше радиус, тем больше порог. Другими словами, время развития пузырей при большой амплитуде начальных облаков от этой амплитуды практически не зависит.

Наклонный линейный участок указанной функциональной зависимости позволил ввести и вычислить *характерное время развития нелокальной НРТ*. В описанных численных экспериментах получено, что характерное время развития нелокальной НРТ равно 500 с, что в пять раз больше величины характерного времени развития локальной НРТ.



### 3. Динамика ионосферных пузырей

Рассмотрим динамику ионосферных пузырей на развитой нелинейной стадии. Было поставлено четыре серии численных экспериментов, при которых исследовано:

- 1) влияние проводящей подложки под F-слоем;
- 2) развитие молекулярных ионосферных пузырей и частичное восполнение концентрации плазмы в ножке пузыря;
- 3) параметры теплового режима внутри ионосферных пузырей;
- 4) взаимодействие множественных пузырей.

**1. Влияние проводящей подложки под F-слоем.** Влияние продольной амбиполярной диффузии и педерсеновской проводимости E-слоя легко прослеживаются на линейной стадии развития НРТ и приводит к уменьшению инкремента нарастания. Были проведены численные исследования нелинейной динамики НРТ в экваториальной F-области под действием этих факторов – разумеется, на трехмерной модели [6].

Начальное возмущение задавалось двумя способами в области положительного инкремента НРТ:

- 1) в виде неглубокого (5 %) трехмерного пузырька, однородного по высоте. Такие пузырьки с характерным размером вдоль силовых линий геомагнитного поля 1000 км моделируют естественные возмущения;
- 2) в виде глубокого (90 %) трехмерного пузыря. Такие пузыри с характерным продольным размером 100 км моделируют искусственные возмущения.

Расчеты показали, что трехмерные рэлей-тейлоровские структуры развивались стандартно, уходя во внешнюю ионосферу. Бифуркаций, полученных в работе американцев [3], не было отмечено. Влияние продольной амбиполярной диффузии и педерсеновской проводимости E-слоя свелось к замедлению темпа развития пузыря и сглаживанию распределения электронной концентрации вдоль силовых линий геомагнитного поля. Наибольший эффект торможения развития пузыря наблюдался при инициируемых возмущениях искусственного типа.

Кроме того, в динамике неоднородности искусственного происхождения выделились две стадии: диффузионная и рэлей-тейлоровская. На первой стадии произошло продольное расплывание начальной неоднородности и формирование нового квазиравновесного продольного распределения электронов. На второй стадии наблюдалось развитие собственно НРТ с инкрементом, определяемым в значительной степени характеристиками фоновой плазмы.

**2. Развитие молекулярных ионосферных пузырей.** НРТ в экваториальной F-области генерируется у ее основания, где доминируют молекулярные ионы  $\text{NO}^+$  и  $\text{O}_2^+$ . В результате за счет электродинамического дрейфа становится возможным вынос молекулярных ионов во внешнюю ионосферу, что подтверждается экспериментом [12]. При этом внутри пузырей возникает сильная депрессия плазменной концентрации, что приводит к сильным электрическим полям и большим дрейфовым скоростям (несколько км/с). По этой причине, а также из-за па-



дения с высотой частот столкновений с нейтралами желателно учитывать инерционность компонентов плазмы.

Численные эксперименты на двумерной модели [7] показали, что на развитой стадии пузыря, для которой свойственно значительное падение электронной концентрации внутри него, ионы  $\text{NO}^+$  эффективно вытягивались на большие высоты.

Расчеты также выявили [7], что особенностью формирования структур НРТ при учете инерции было формирование выраженной пространственной долготной асимметрии, вследствие которой ножка грибообразного пузыря частично пережалась и его грибообразная форма начала распадаться. При этом образовался изолированный плазменный пузырь на высотах выше F-максимума, который ушел во внешнюю ионосферу.

После распада пузыря содержание ионов  $\text{NO}^+$  во внешней ионосфере быстро упало.

**3. Параметры теплового режима внутри ионосферных пузырей.** Аналитически показано, что разогрев пузырей соответствует депрессии плазмы и влияет на динамику их развития через зависимость от температуры аэрономии и частот столкновений [13]. Там же вычислено, что при сильном опустошении пузырей температура ионов достигает 9000K, во много раз превышая температуру фона.

Были проведены трехмерные численные эксперименты по моделированию эволюции ионосферных пузырей с учетом механизма НРТ, поляризационных электрических полей, амбиполярной продольной диффузии, продольного и поперечного теплопереноса, локальных процессов аэрономии и теплообмена [8].

Расчеты показали, что при падении концентрации на порядок ионная температура возрасла до 7000K, что согласуется с теорией. Для депрессии концентрации два порядка и более разогрев ионов превысил 20000K, причем рост ионной температуры происходил в режиме с обострением, длящемся десятки секунд. При таких условиях и вдобавок сильном разрежении плазменного газа вероятность регистрации в натурном эксперименте очень большой температуры мала.

Кроме того, с углублением пузыря возникло сильное нарушение теплового равновесия, температура ионов намного превысила температуру электронов. Сильный разогрев плазмы внутри пузырей привел также к значительным продольным градиентам температуры у основания F-области. При этом максимум электронной температуры находился на вершине силовых линий геомагнитного поля, тогда как максимум ионной температуры смещен к основанию F-области.

**4. Взаимодействие множественных пузырей.** Спутниковые измерения обнаружили в ночной экваториальной F-области ионосферы *множественные пузыри* — группы пузырей, случайно расположенных друг относительно друга по долготе [12]. Начало модельного изучения динамики таких систем было положено рассмотрением электродинамики системы стационарных пузырей эллипсоидальной формы [14].

Проведение численных экспериментов на двумерной модели показало [9], что самоорганизация системы пузырей имеет закономерности:



- 1) квазипериодичность пространственно-временной структуры — пузыри могут развиваться попеременно. Это исключает удовлетворительное описание системы в рамках стационарного приближения;
- 2) опережающее развитие центральных пузырей системы при одно-временном запуске всех пузырей. В стационарном приближении получен противоположный вывод об опережающем развитии самых крайних пузырей;
- 3) одновременное существование не более двух сильно развитых пузырей. Этот естественный отбор пузырей согласуется с данными ионосферных измерений [12].

62

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проектам № 11-01-00558-а, № 11-01-00098-а и № 09-01-00628-а.*

### Список литературы

1. Гершман Б. Н., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д., Чернобровкина Н. А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М., 1984.
2. Комаров В. Н., Сазонов С. В. Об аналитическом подходе к исследованию рэлей-тейлоровских структур экваториальной F-области // Геомагнетизм и аэрoномия. 1991. Т. 31, №6. С. 1032—1036.
3. Zalesak S. T., Ossakow S. L., Chaturvedi P. K. Nonlinear equatorial spread F: the effect of neutral winds and background pedersen conductivity // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87, N A1. P. 151—166.
4. Кащенко Н. М., Мацневский С. В. Математическое моделирование неустойчивостей экваториального F-слоя ионосферы // Вестник Калининградского государственного университета. 2003. Вып. 3. С. 59—68.
5. Мацневский С. В., Никитин М. А., Пец А. В. О нелинейной стадии развития неустойчивости Рэля — Тейлора в экваториальной F-области // Геомагнетизм и аэрoномия. 1987. Т. 27, №6. С. 921—924.
6. Кащенко Н. М., Мацневский С. В., Никитин М. А. Исследования нелинейной стадии развития неустойчивости Рэля — Тейлора в экваториальной F-области с учетом продольной диффузии и педерсеновской проводимости E-области // Геомагнетизм и аэрoномия. 1989. Т. 29, №4. С. 577—582.
7. Мацневский С. В., Кащенко Н. М., Никитин М. А. Ионосферные пузыри: ионный состав, скорости движения плазмы и структура // Известия вузов. Радиофизика. 1989. Т. 32, №11. С. 1320—1326.
8. Ерохин Н. С., Кащенко Н. М., Мацневский С. В., Никитин М. А. Тепловой режим внутри ионосферных пузырей // Космические исследования. 1990. Т. 28, вып. 1. С. 85—93.
9. Кащенко Н. М., Мацневский С. В., Никитин М. А. Динамика системы множественных рэлей-тейлоровских ионосферных пузырей // Геомагнетизм и аэрoномия. 1990. Т. 30, №2. С. 281—286.
10. Кащенко Н. М., Киселецкий С. П., Мацневский С. В., Никитин М. А. Резонансная генерация ионосферных пузырей внутренними гравитационными волнами // Геомагнетизм и аэрoномия. 1990. Т. 30, №3. С. 446—451.
11. Гайдюков В. Ю., Кащенко Н. М., Мацневский С. В. и др. Запуск экваториальных пузырей путем модификации E-слоя // Геомагнетизм и аэрoномия. 1991. Т. 31, №6. С. 1042—1048.
12. Фельдштейн А. Я. «Пузыри» в экваториальной ионосфере и сопутствующие явления // Ионосферные исследования. 1986. №41. С. 70—87.





13. Генкин Л. Г., Ерухимов Л. М., Мясников Е. Н., Шварц М. М. К вопросу об образовании и всплывании неизотермических ионосферных и хромосферных «пузырей» // Известия вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, №5. С. 567–577.

14. Chen J., Satyanarayana P., Ossakow S. L. The morphology of a multi-bubble system in the ionosphere // J. Geophys. Res. 1983. Vol. 88, N A7. P. 5528–5536.

### **Об авторах**

Сергей Валентинович Мациевский — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: matsievsky@newmail.ru.

Леонид Викторович Зинин — канд. физ.-мат. наук, зав. каф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

### **Authors**

Dr Sergey Matsievsky — assistant professor, I. Kant Baltic Federal University, e-mail: matsievsky@newmail.ru.

Dr Leonid Zinin — head of department, I. Kant Baltic Federal University.