

УДК 533.908

## МЕЛКОМАСШТАБНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

*В. А. Алимов, В. А. Зиничев, Н. А. Митяков, С. Н. Митяков*

Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Обсуждаются результаты исследований естественной и искусственной мелкомасштабной турбулентности в верхней ионосфере. Первые данные о спектре размеров неоднородностей на высотах 240÷340 км были получены в 70-х годах методом ракурсного рассеяния радиоволн и методом просвечивания ионосферы радиосигналами искусственных спутников Земли. В период 2009–2011 годов с использованием радара стенда «Сура» методом обратного рассеяния радиоволн получены новые сведения о неоднородностях с размером около 20 м. Радарные измерения позволили дополнить эмпирическую модель неоднородностей в слое  $F$  ионосферы.

### ВВЕДЕНИЕ

Результаты исследований модификации ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением помещены в различных статьях и монографиях (см. [1–3] и цитируемую там литературу). Получены данные о структуре и динамике естественной и искусственной ионосферной турбулентности, созданы теоретические модели возбуждения и релаксации искусственных неоднородностей в результате воздействия на ионосферу мощными радиоволнами. Большое внимание было уделено эффекту «магнитного зенита», состоящему в том, что наиболее сильные возмущения ионосферной плазмы возникают не в зенитном направлении, а в направлении, близком к магнитному полю Земли. Вместе с тем остаётся открытым ряд важных вопросов. В частности, слабо исследована мелкомасштабная турбулентность выше максимума  $F$ -слоя ионосферы. В статье приведён краткий обзор результатов исследований мелкомасштабной турбулентности в верхней ионосфере, включая новые результаты радарных исследований на стенде «Сура». Обсуждаются эмпирическая модель и возможный механизм возбуждения турбулентности выше главного максимума ионосферы.

### 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ИОНОСФЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОСИГНАЛОВ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

В 70-е годы для исследования искусственных неоднородностей широко использовался метод ракурсного рассеяния радиоволн на неоднородностях плазмы, сильно вытянутых вдоль геомагнитного поля [1–3]. Такие неоднородности с размерами 3÷30 м поперёк геомагнитного поля генерируются в области отражения волны накачки в результате взаимодействия мощных радиоволн с плазменными волнами (резонансная или параметрическая неустойчивости). Отношение продольных и поперечных размеров таких неоднородностей (степень анизотропии) составляет  $\alpha \geq 100$ . Более крупные неоднородности с размерами 300÷3000 м возникают в результате самофокусировочной неустойчивости ниже области отражения мощной волны [1] и регистрируются методом наземного приёма радиосигналов искусственных спутников Земли (ИСЗ). В работах [4, 5] были обнаружены искусственные неоднородности, расположенные выше максимума  $F$ -слоя ионосферы. Высота неоднородностей (300÷400 км) определялась путём измерения временного сдвига мерцаний радиосигналов орбитальных ИСЗ, принятых на разнесённые в пространстве антенны.

Наиболее ценная информация о структуре и динамике турбулентности в верхней ионосфере была получена в цикле наблюдений за сигналами геостационарного ИСЗ ATS-6 в июле 1976 года [6]. Нагрев ионосферы осуществлялся стендом «Ястреб» на полигоне НИРФИ «Зимёнки» на частоте 4,6 МГц. Эффективная мощность волны накачки составляла  $PG \approx 15$  МВт. Мощный передатчик работал циклами (5÷7 мин нагрев и 5÷8 мин пауза). Сигналы ATS-6 в диапазоне частот 40÷41 МГц регистрировались круглосуточно в двух территориально разнесённых пунктах вблизи г. Котлас. Ионосферные неоднородности вызывали мерцания сигнала спутника. Это позволило получить данные о неоднородностях на высотах  $h_1 \approx 240 \div 280$  км и  $h_2 \approx 300 \div 340$  км. Условия нагрева ионосферы не были оптимальными, поэтому искусственные неоднородности на высоте  $h_2$  наблюдались только в течение двух вечеров из 8 дней наблюдений. Высота максимума  $F$ -слоя в вечернее время составляла  $h_F \approx 290$  км. Неоднородности появлялись сначала ниже, а затем (с задержкой на 3÷4 мин) — выше максимума  $F$ -слоя.

Спектр масштабов искусственных неоднородностей в интервале высот  $h_1 \approx 240 \div 280$  км имел характерный максимум вблизи  $l \approx 500 \div 600$  м. Выше максимума ионосферы ( $h_2 \approx 300 \div 340$  км) спектр естественных и искусственных неоднородностей в области масштабов  $l \approx 300 \div 3000$  м был степенным с показателем степени  $p \approx 4$ , близким к колмогоровскому ( $p_k = 11/3$ ). Искусственные неоднородности с поперечным размером 500 м имели величину относительной дисперсии электронной концентрации  $\delta N^2 \approx 10^{-6}$ . Для естественных неоднородностей ионосферы степенной спектр с показателем степени  $p \approx 4$  имел место в обоих приёмных пунктах [6].

Стенд «Сура» с большой эффективной мощностью  $P_{эф} \approx 300$  МВт позволил получить ряд новых результатов об искусственных ионосферных неоднородностях. Методом просвечивания ионосферы сигналами орбитальных ИСЗ в работе [7] было установлено, что интенсивные флуктуации принимаемых сигналов ИСЗ «Транзит» на частотах 150 и 400 МГц наблюдаются преимущественно к югу относительно вертикальной оси диаграммы антенны передающего стенда «Сура». В работе [8] показано, что более интенсивные неоднородности плазмы возбуждаются при наклоне пучка радиоволн на  $12^\circ$  к югу. В этом случае из-за рефракции радиоволн ось пучка радиоволн в области взаимодействия совпадает с направлением геомагнитного поля, составляющего  $19^\circ$  с вертикалью, создавая эффект магнитного зенита (см. [1]).

В работе [9] обсуждается двухслойная модель искусственной ионосферной турбулентности. В области отражения мощного пучка радиоволн (высота  $h_1 \approx 240 \div 280$  км) существуют два источника искусственных неоднородностей — резонансная и самофокусирующая неустойчивости. Неоднородности с масштабами 3÷30 м сильно вытянуты вдоль геомагнитного поля ( $\alpha \geq 100$ ). Такие неоднородности вызывают ракурсное рассеяние радиоволн. В области масштабов 300÷3000 м неоднородности ответственны за мерцания сигналов ИСЗ. На высоте  $h_1 \approx 240 \div 280$  км толщина слоя с неоднородностями не превышает 30 км [1–3].

Второй слой расположен выше максимума ионизации на высоте  $h_2 \approx 300 \div 400$  км. Неоднородности в этом слое имеют размер 60÷6000 м и появляются через 3÷4 мин после включения волны накачки. Здесь в области масштабов 300÷3000 м имеет место степенной спектр естественных и искусственных неоднородностей с показателем степени  $p \approx 4$ , близком к колмогоровскому. В [9] предполагается, что верхний слой образуется в результате переноса (распада) ионосферной турбулентности с низких высот внутренними гравитационными волнами естественного или искусственного происхождения.

## 2. РАДАРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ИОНОСФЕРЕ

Новые результаты исследований мелкомасштабной турбулентности выше максимума  $F$ -слоя ионосферы были получены в радарных экспериментах на стенде «Сура» [10–12]. Уникальный радар на базе стенда «Сура» был создан в 2005 году для радиоакустических исследований тропосферы и нижней ионосферы. Летом 2006 года в радарных сигналах было обнаружено обратное рассеяние радиоволн до высоты около 300 км [10]. В период 2009–2011 годов были проведены специальные радарные эксперименты для исследования мелкомасштабной структуры естественной и искусственной турбулентности выше максимума  $F$ -слоя ионосферы [11, 12]. Для зондирования ионосферы использовался один из трёх радиопередатчиков стенда «Сура», подключенный к одной секции антенны стенда. Радиопередатчик работал в импульсном режиме с мощностью в импульсе около 200 кВт (эффективная мощность излучения в импульсе  $PG \approx 17$  МВт). Приём рассеянных сигналов осуществлялся другой секцией антенны стенда. Радиозондирование проводилось излучением обыкновенной поляризации импульсами с длительностью  $\tau = 200 \div 300$  мкс с периодом повторения  $T = 15$  мс. Радар работал на одной из четырёх частот: 5 828 кГц; 7 815 кГц; 8 900 кГц и 9 310 кГц, каждая из которых всегда была выше критической частоты  $F$ -слоя ионосферы. Для исследования эффектов воздействия мощного коротковолнового радиоизлучения на ионосферу в ряде радарных сеансов включался второй передатчик стенда «Сура», который работал в непрерывном режиме нагрева на частоте 4 785 кГц (ниже критической частоты ионосферы). Работа нагревного передатчика проводилась циклами по 10 мин (5 мин нагрев с последующей паузой в 5 мин). Для контроля состояния ионосферы работал ионозонд.

Первые детальные исследования ионосферной турбулентности с использованием радара стенда «Сура» были проведены в 2009 году [11]. Аналогичные измерения были выполнены в 2010 и 2011 годах [12]. Зондирование обычно проводилось в светлое время суток, в некоторых сеансах — в вечернее время. Общее время наблюдений в 2009–2011 годах составило более 200 час. Практически всегда на различных высотах наблюдались сигналы, рассеянные на естественных неоднородностях с размерами около 20 м (половина длины волны).

В диапазоне высот 80–120 км в 95 % дневных сеансов имели место хорошо известные сигналы обратного рассеяния в слоях ионосферы  $D$  и  $E$ . В диапазоне высот 150–280 км сигналы обратного рассеяния появлялись существенно реже (примерно в 20 % случаев). Выше максимума  $F$ -слоя ионосферы (интервал высот порядка 300–500 км) в естественных условиях рассеянные сигналы наблюдались примерно в половине случаев, а их интенсивность на входе приёмника в разных сеансах изменялась в пределах  $5 \cdot 10^{-13} \div 3 \cdot 10^{-11}$  Вт.

В 2009–2011 годах было проведено 12 сеансов радарных измерений, во время которых работал мощный передатчик стенда «Сура». Недостаточная эффективная мощность пучка радиоволн ( $PG \approx 15 \div 20$  МВт), как и в [6], стала причиной малой вероятности возбуждения искусственной турбулентности. Лишь в одном сеансе 20 мая 2009 года в 12:40 MSK на частоте 8,9 МГц был уверенно зарегистрирован сигнал, рассеянный искусственными неоднородностями на высотах 330–450 км. Сразу после выключения мощного передатчика интенсивность рассеянного сигнала на входе приёмника составляла  $5 \cdot 10^{-12}$  Вт. Через 10 с интенсивность сигнала снизилась до естественного уровня  $0,5 \cdot 10^{-12}$  Вт. В этом сеансе волна накачки с частотой 4 785 кГц отразалась на высоте 220 км. В области отражения волны накачки обратное рассеяние на искусственных неоднородностях не наблюдалось.

### 3. О МОДЕЛИ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

В разделе 1 приведена эмпирическая модель мелкомасштабной ионосферной турбулентности на основании результатов спутниковых исследований и экспериментов по ракурсному рассеянию радиоволн. Радарные измерения позволяют дополнить эмпирическую модель неоднородностей:

1) В работе [11] на основе статистической теории рассеяния радиоволн получены выражения, связывающие интенсивность обратного рассеяния с параметрами ионосферных неоднородностей. Используя данные об интенсивности рассеянного сигнала [11], а также данные о дисперсии электронной концентрации и степенном спектре неоднородностей [6], можно сделать вывод, что естественные и искусственные мелкомасштабные неоднородности выше максимума слоя  $F$  слабо вытянуты вдоль геомагнитного поля. Отношение продольных и поперечных размеров мелкомасштабных неоднородностей выше максимума  $F$ -слоя составляет величину  $\alpha \leq 10$ .

2) В области отражения мощной волны накачки степень анизотропии неоднородностей составляет величину  $\alpha \geq 100$  [1–3]. Как показано в [11], для вертикального луча радара стенда «Сура» интенсивность обратного рассеяния радиоволн пропорциональна  $\alpha^{-3}$ , что приводит к значениям на 60 дБ и более ниже интенсивности ракурсного рассеяния. Именно этим можно объяснить отсутствие обратного рассеяния на искусственных неоднородностях в области отражения волны накачки (см. раздел 2).

3) При мощности волны накачки  $PG \approx 17$  МВт дисперсия электронной концентрации для искусственных неоднородностей на 20 дБ больше, чем для естественных неоднородностей (см. раздел 2).

4) Как естественные, так и искусственные неоднородности с масштабом около 20 м в дневное и вечернее время чаще всего наблюдаются в диапазоне высот 300–500 км [12].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09–02–00257).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
2. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // УФН. 2007. Т. 177, № 3. С. 350.
3. Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во КГУ, 1991.
4. Ерухимов Л. М., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 12. С. 1814.
5. Bowhill S. A. // Radio Sci. V. 9, No. 11. P. 1974.
6. Митякова Э. Е., Мясников Е. Н., Рахлин А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 6. С. 939.
7. Выборнов Ф. И., Ерухимов Л. М., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 4. С. 491.
8. Tereshenko E. D., Khudukon B. Z., Gurevich A. V., et al. // Phys. Lett. A. 2004. V. 325. P. 381.
9. Алимов В. А., Выборнов Ф. И., Рахлин А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 7. С. 561.
10. Зиничев В. А., Митяков Н. А., Рапопорт В. О. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 1. С. 13.
11. Митяков Н. А., Алимов В. А., Зиничев В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 36. С. 329.

12. Митяков Н. А., Алимов В. А., Зиничев В. А., Комраков Г. П. Мелкомасштабные неоднородности в ионосфере. Результаты радарных исследований: Препринт № 544 НИРФИ. Нижний Новгород, 2011.

Поступила в редакцию 10 октября 2011 г.; принята в печать 28 октября 2011 г.

## SMALL-SCALE TURBULENCE IN THE UPPER IONOSPHERE

*V. A. Alimov, V. A. Zinichev, N. A. Mityakov, and S. N. Mityakov*

We discuss the results of the study of natural and artificial small-scale turbulence in the upper ionosphere. The first data on the size spectrum of irregularities at the altitudes 240–340 km was obtained in the 70-s by the method of the aspect scatter of radio waves and the method of radio-raying of the ionosphere by radio signals from on-orbit satellites. New data on the irregularities with a size of about 20 m was obtained by the method of backscattering of radio waves in the period 2009–2011 using the “Sura” facility radar. The radar measurements allowed us to complement the empirical model of irregularities in the  $F$  layer of the ionosphere.