УДК 533.908

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СЛОЕ *F* ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН

Н. А. Митяков, В. А. Алимов, В. А. Зиничев, Г. П. Комраков, С. Н. Митяков

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

В 2006 году с помощью радара стенда «Сура» были впервые зарегистрированы сигналы обратного рассеяния радиоволн от мелкомасштабных неоднородностей, расположенных на высотах от 200 до 400 км. Летом 2009 года на стенде «Сура» были проведены повторные эксперименты. В 10 % случаев наблюдались радарные сигналы, рассеянные в области высот 300÷500 км. Обнаружено заметное изменение интенсивности радарных сигналов при модификации ионосферы мощными радиоволнами. В статье обсуждается возможность экспериментального исследования спектра мелкомасштабной турбулентности верхней ионосферы с помощью модифицированного метода обратного рассеяния коротких радиоволн.

#### 1. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования тропосферы и мезосферы в 2005 году на базе стенда «Сура» был создан радар с уникальным энергетическим потенциалом. Радар работал на частоте около 9 МГц [1]. В результате экспериментов, проведённых летом 2006 года, было обнаружено обратное рассеяние радиоволн мелкомасштабными неоднородностями, расположенными в области высот от 200 до 400 км [2]. Измерения поперечника обратного рассеяния радиоволн в верхней ионосфере представляют интерес для исследования процессов возбуждения, релаксации и переноса естественной и искусственной ионосферной турбулентности.

Летом 2009 года была проведена вторая серия радарных экспериментов для исследования естественной и искусственной турбулентности в слое F ионосферы. Для зондирования ионосферы, как и в 2006 году, использовался один из трёх радиопередатчиков стенда «Сура», подключённый к одной из секций антенны стенда. Радиопередатчик работал в импульсном режиме с пиковой мощностью около 200 кВт. Приём рассеянных сигналов осуществлялся другой секцией антенны включала в себя 48 скрещённых широкополосных диполей, размещённых на площадке с размерами  $300 \times 100$  м. Скрещённые диполи формируют круговую поляризацию излучаемых радиоволн. Радиозондирование ионосферы проводилось на обыкновенной моде. Синфазная запитка диполей создавала вертикальный пучок радиоволн с угловыми размерами  $6^{\circ} \times 18^{\circ}$ . Сигнал с приёмной антенны поступал на вход радиоприёмника с полосой пропускания 30 кГц. На выходе радиоприёмника сигнал имел частоту 127,8 кГц. Оцифровка сигнала на частоту 14,2 кГц. Частота передатчика и частота гетеродинов приёмно-регистрирующей аппаратуры синхронизованы общим стандартом частоты, что позволяло регистрировать как амплитуду, так и фазу рассеянного сигнала.

Как правило, зондирование проводилось импульсами с длительностью  $\tau = 200$  мкс и тактовым периодом T = 15 мс. Максимальная дальность зондирования составляла 2250 км, а разрешающая способность 30 км. Радар работал на одной из четырёх частот: 9310; 8900; 7815 и 5828 кГц; критическая частота ионосферы всегда была ниже приведённых значений. В отдельных сеансах проводились оперативные (в течение  $0.5\div1$  минуты) переключения несущей частоты



Рис. 1. Ионограмма, зарегистрированная в 12:50 MSK 20 мая 2009 года

радара и частоты настройки радиоприёмника. Для исследования влияния эффектов воздействия на ионосферу мощными радиоволнами в некоторых случаях во время работы радара на 5 минут включался второй передатчик стенда «Сура», работавший в непрерывном режиме на частоте 4 785 кГц. Радарное зондирование ионосферы сопровождалось работой ионозонда.

С мая по август 2009 года было проведено четыре недельных цикла радарных экспериментов. Ниже приводятся результаты обработки данных, полученных в типичном сеансе наблюдений 20 мая 2009 года в 12:50 MSK. Рабочая частота радара составляла 8,9 МГц. О состоянии ионосферы можно судить по ионограмме, приведённой на рис 1. На ионограмме отчётливо видны отражения от слоёв E,  $F_1$  и  $F_2$ . Критическая частота ионосферы была несколько ниже 6 МГц, а высота максимума ионизации — около 270 км. Сплошная линия, отмеченная стрелкой, соответствует истинным высотам отражения сигналов ионозонда.

На рис. 2 приведена осциллограмма радарных сигналов с развёрткой по дальности до 2245 км. На высотах  $80\div120$  км видны сигналы, рассеянные в D и E-слоях ионосферы. Группа сигналов в интервале высот  $330\div550$  км является результатом рассеяния радиоволн выше максимума Fслоя. Амплитуда рассеянного в слое F сигнала составляла около 10 мкВ. На дальностях от 1 000 до 1 300 км видны сигналы возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) ионосферы. Сигналы ВНЗ хорошо известны и наблюдаются при наклонном падении радиоволн на ионосферу на частотах, превышающих критическую частоту, с последующим обратным рассеянием радиоволн мелкомасштабными неоднородностями на поверхности Земли [3, 4]. Сигналы ВНЗ могут стать помехой для сигналов, рассеянных ионосферными неоднородностями на высотах 200÷700 км. Так, в присутствии спорадического слоя E сигналы ВНЗ могут иметь дальность от 200 до 400 км [3].

Отличить сигналы обратного рассеяния в сло<br/>еFот сигналов ВНЗ не представляет трудностей, если имеются высотно-част<br/>отные характеристики ионосферы. Группа сигналов ВНЗ на

дальностях 1000÷1300 км полностью соответствует параметрам слоя F. На ионограмме, приведённой на рис. 1, спорадический слой  $E_s$  отсутствовал, поэтому радарные сигналы в интервале дальностей 330÷550 км являются результатом обратного рассеяния радиоволн на неоднородностях, расположенных выше максимума F-слоя ионосферы. Рассеянные сигналы на расстояниях 200÷600 км наблюдались примерно в 20 % сеансов, проведённых летом 2009 года, но только в 10 % случаев, как и в сеансе 20 мая, слой  $E_s$  отсутствовал и радарные сигналы определялись неоднородностями в слое F.



Рис. 2. Осциллограмма радарных сигналов, полученная в 12:40 MSK 20 мая 2009 года



Рис. 3. Фрагмент яркостной записи регистрируемого сигнала в 12:40 MSK 20 мая 2009 года





Рис. 4. Регистрация интенсивности W рассеянного сигнала в 12:40 MSK 20 мая 2009 года на высоте 340 км

Рис. 5. Спектр рассеянного сигнала в 12:40 MSK 20 мая 2009 года

На рис. 3 приведён фрагмент яркостной записи регистрируемых сигналов на временном интервале 60 с и на интервале высот от 0 до 528 км. Осциллограмма сигнала, приведённая на рис. 2, представляет собой одну из вертикальных строк на 50-й секунде яркостной записи фрагмента. Синусоидальный сигнал на яркостной записи представляет собой чередующиеся полосы — тёмные (отрицательные значения) и светлые (положительные значения). Наклон этих полос определяется изменением фазы сигнала за счёт вертикального движения неоднородностей. В области высот 0÷60 км сигналы отсутствуют, поскольку приёмник радара заперт с целью защиты от перегрузки зондирующим импульсом. На высотах от 80 до 130 км видны сигналы, рассеянные в *D*- и *E*-слоях ионосферы, а в интервале высот 330÷528 км рассеяние происходило в *F*-слое. В представленном сеансе в течении 5 минут в непрерывном режиме работал второй передатчик ПКВ-250 на частоте 4,785 МГц. Нагревный передатчик был выключен через 3 секунды после начала фрагмента, представленного на рис. 3. Поэтому в первые 3 секунды фрагмента приёмник радара был перегружен и почти заперт. Последующая запись сигнала на рис. 3 отражает процессы релаксации искусственных неоднородностей.

Средняя интенсивность рассеянного сигнала в течение первых 10 с уменьшилась почти на порядок — от 5 до  $0.5 \cdot 10^{-12}$  Вт на входе приёмника (см. рис. 4). Можно считать, что через  $10 \div 15$  с после выключения мощного передатчика неоднородности восстанавливаются до своего естественного уровня.

На яркостной записи рис. 3 отчётливо видны движения неоднородностей на разных высотах. В интервале высот от 370 до 500 км фаза рассеянного сигнала почти постоянна, что говорит о малой скорости движений. Особый интерес представляет интервал высот от 340 до 370 км. В первые 10÷15 с после выключения мощного передатчика наклон линий сигнала почти регулярный, что соответствует постоянной скорости неоднородности, затем их скорость заметно снижается. На рис. 5 приведён спектр сигнала, рассеянного на высотах 340÷370 км в интервале времени от 3 до 18 секунд. Жирная и тонкая линии относятся к положительным и отрицательным значениям допплеровского сдвига частоты соответственно. В максимуме спектра допплеровский сдвиг составляет 0,2 Гц, что соответствует движению неоднородностей вверх со скоростью около 4 м/с.

### 2. О СПЕКТРЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Результаты эксперимента можно использовать для оценки параметров мелкомасштабной турбулентности в верхней ионосфере.

Статистическая теория распространения радиоволн в турбулентных средах позволяет про-

водить расчёты средней мощности высокочастотного радиосигнала, рассеянного слабыми неоднородностями диэлектрической проницаемости среды. Такие расчёты, как правило, проводятся в приближении однократного рассеяния волн [5, 6]. Применительно к случаю обратного рассеяния коротковолновых сигналов турбулентной областью верхней ионосферы соответствующие формулы имеют следующий вид (см. также [5, 6]):

$$P_{\rm s} = P_0 G_0 \, \frac{\sigma}{(4\pi r^2)^2} \, \frac{\lambda^2 G_0}{4\pi} \,, \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{\pi}{2} k_0^4 \Phi_{\varepsilon}(\boldsymbol{\kappa}_0, 0) \nu_{\mathrm{b}\Phi\Phi}, \qquad (2)$$

$$\nu_{\mathrm{s}\Phi\Phi} = \iiint_{-\infty}^{+\infty} |f_0(\mathbf{n}_{\mathrm{s}})|^4 \frac{\Phi_{\varepsilon}(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{R})}{\Phi_{\varepsilon}(\boldsymbol{\kappa}_0, 0)} \,\mathrm{d}^3 R,\tag{3}$$

$$\Phi_{\varepsilon}(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{R}) = \frac{\omega_{\mathrm{p}}^4}{\omega^4} \Phi_{\delta N}(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{R}).$$
(4)

Здесь введены следующие обозначения:  $P_0$ ,  $P_s$  — средние мощности излучаемого и принимаемого сигналов,  $G_0$  — коэффициент направленного действия приёмопередающей антенны локатора, r — наклонная дальность от локатора до цели (области обратного рассеяния радиоволн в ионосфере),  $k_0 = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  и  $\omega$  — длина волны и круговая частота излучения,  $\sigma$  — поперечник обратного рассеяния волн,  $\nu_{s\phi\phi}$  — эффективный объём рассеяния,  $|f_0(\mathbf{n}_s)|$  — диаграмма направленности излучения локатора,  $\omega_p$  — плазменная частота электронов в области рассеяния волн в ионосфере,  $\Phi_{\varepsilon}(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{R})$  — спектр турбулентности рассеивающей области ионосферы,  $\boldsymbol{\kappa}$  — волновой вектор неоднородностей,  $\boldsymbol{\kappa}_0$  — его значение в центре рассеивающей области при  $|\mathbf{R}| = 0$ ,  $\mathbf{R}$  — радиус-вектор внутри области рассеяния радиоволн.

Для случая узкой диаграммы направленности приёмопередающей антенны приведённые формулы позволяют проводить расчёты средней мощности  $P_{\rm s}$  принимаемого высокочастотного сигнала, рассеяного областью с заданной турбулентной структурой (с заданным спектром турбулентности  $\Phi_{\varepsilon}(\kappa)$  диэлектрической проницаемости ионосферной плазмы). При этом, в отличие от случая диагностики изотропной тропосферной турбулентности [5], для ионосферной турбулентности следует учитывать анизотропный характер мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации [6].

Будем предполагать, что спектр неоднородностей электронной концентрации ионосферной плазмы описывается обобщённой функцией Кармана (см. [6]):

$$\Phi_N(\boldsymbol{\kappa}) = \frac{C}{[L_{0\perp}^{-2} + (\kappa_{\perp}^2 + \alpha^2 \kappa_{\parallel}^2)]^{p/2}}.$$
(5)

Здесь  $\alpha = L_{0\parallel}/L_{0\perp}$  — степень анизотропии неоднородностей,  $L_{0\perp}$  и  $L_{0\parallel}$  — внешние масштабы ионосферной турбулентности (поперечный и продольный к магнитному полю Земли),  $\kappa_{\perp}$  и  $\kappa_{\parallel}$  — компоненты волнового вектора неоднородностей поперёк и вдоль магнитного поля,  $l_{\perp}$  и  $l_{\parallel}$  — размеры неоднородностей электронной концентрации ионосферы поперёк и вдоль магнитного поля, p — показатель спектра неоднородностей.

Постоянная C, входящая в соотношение (5), может быть определена из условия нормировки [6]:

$$\overline{(\Delta N)_0^2} = \iiint_{-\infty}^{+\infty} \Phi_N(\boldsymbol{\kappa}, \mathbf{R}) \,\mathrm{d}\boldsymbol{\kappa},\tag{6}$$

Н. А. Митяков, В. А. Алимов, В. А. Зиничев и др.

333

где  $\overline{(\Delta N)_0^2}$  — дисперсия флуктуаций электронной концентрации ионосферной плазмы.

В результате несложных вычислений из соотношений (5), (6) можно получить выражение для анизотропного спектра ионосферной турбулентности:

$$\Phi_N(\boldsymbol{\kappa}) = \alpha L_{0\perp}^p A(p) \frac{C_N^2}{[1 + L_{0\perp}^2 (\kappa_{\perp}^2 + \alpha^2 \kappa_{\parallel}^2)]^{p/2}},$$
(7)

где

$$C_N^2 = 2 \overline{\left(\frac{\Delta N}{N}\right)_0^2} \middle/ L_{0\perp}^{p-3}$$

— квадрат структурной постоянной турбулентности ионосферной плазмы,  $\overline{(\Delta N/N)_0^2}$  — дисперсия относительных флуктуаций электронной концентрации в ионосфере,

$$A(p) = [4\pi B (3/2; (p-3)/2)]^{-1}, \qquad B(q_1, q_2) = \int_0^\infty \frac{x^{q_1-1}}{(1+x)^{q_1+q_2}} \,\mathrm{d}x$$

 $-\beta$ -функция.

Для случая мелкомасштабной турбулентности (при условии  $l_{\perp} \ll L_{0\perp}$ ) соотношение (7) преобразуется к виду:

$$\Phi_N(\boldsymbol{\kappa}) = \frac{C_N^2 \alpha A(p)}{(\kappa_\perp^2 + \alpha^2 \kappa_\parallel^2)^{p/2}}.$$
(8)

Из этого соотношения следует, что спектр мелкомасштабной турбулентности ионосферной плазмы определяется тремя параметрами: показателем спектра p, степенью анизотропии неодностей  $\alpha$  и структурной постоянной турбулентности  $C_N$ .

При обратном рассеянии радиоволн мелкомасштабной турбулентностью верхней ионосферы информация о спектре турбулентности фактически содержится в поперечнике рассеяния волн  $\sigma$  (см. (2)–(4)). В свою очередь, величина  $\sigma$  может быть определена при известных характеристиках локатора из соотношения (1).

Рассмотрим следующую упрощённую модель зондирования мелкомасштабной турбулентности среднеширотной ионосферы. Пусть на плазменный слой верхней ионосферы под углом  $\theta_0$ к вертикали падает радиоволна с волновым вектором  $\kappa_0$ . Магнитное поле Земли **H**<sub>3</sub> составляет с вертикалью угол  $\theta_H$  (магнитное наклонение). Тогда при использовании остронаправленной приёмопередающей антенны локатора для поперечника обратного рассеяния радиоволн можно записать следующее приближённое соотношение (см. (2)-(4) и (8))<sup>1</sup>:

$$\sigma \approx \frac{\pi}{2} k_0^4 \frac{C_N^2 \alpha}{(2k_0)^p} \frac{A(p)\nu_{\vartheta \Phi \Phi}}{\left[\sin^2(\theta_0 + \theta_H) + \alpha^2 \cos^2(\theta_0 + \theta_H)\right]^{p/2}}.$$
(9)

При вертикальном зондировании ( $\theta_0 = 0$ )

$$\sigma_1 \approx \frac{\pi}{2} k_0^4 \frac{C_N^2 \alpha^{-(p-1)}}{(2k_0)^p} A(p) \nu_{\flat \phi \phi 1}, \tag{10}$$

а при наклонном ракурсном зондировании ( $\theta_0 + \theta_H = \pi/2$ ) этой же области ионосферы

 $^1$  При конкретных расчётах мы будем ориентироваться на среднеширотный стенд «Сура» ( $\theta_H=19^\circ).$ 

При выводе соотношений (10) и (11) учтено, что в случае вертикального зондирования мелкомасштабной турбулентности ионосферы эффективный объём рассеяния коротковолновых сигналов равен

$$\nu_{\rm phph} \approx r^2 \,\Delta r \,\Delta \theta_{\rm 0r} \,\Delta \theta_{\rm 0B}.\tag{12}$$

Для ракурсного рассеяния радиоволн на анизотропных ионосферных неоднородностях в случае  $\alpha \gg 1$  имеем (см. (3))

$$\nu_{\rm sppd2} \approx r^2 \,\Delta r \,\Delta \theta_{\rm 0r} \,\alpha^{-1}. \tag{13}$$

Здесь  $\Delta r = c\tau/2$  — размер области обратного рассеяния для локатора с длительностью импульса  $\tau$ ,  $\Delta \theta_{0_{\rm F}}$ ,  $\Delta \theta_{0_{\rm B}}$  — угловые размеры главного лепестка диаграммы направленности приёмопередающей антенны (в горизонтальной и вертикальной плоскостях),  $\alpha^{-1}$  — угловой размер основного лепестка индикатрисы рассеянного сигнала сильно вытянутыми неоднородностями электронной концентрации ( $\alpha^{-1} \ll \Delta \theta_{0_{\rm B}}$ ).

Из соотношений (10) и (12) следует, что при вертикальном зондировании ионосферы для набора длин волн  $\lambda_i$ , где i = 1, 2, 3, ..., выполняется соотношение

$$\lg\left(\frac{\sigma_{1i}}{\sigma_{1\,i+1}}\right) \approx (p-2) \lg\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_{i+1}}\right). \tag{14}$$

Таким образом, отношение измеренных поперечников обратного рассеяния импульсных сигналов при вертикальном зондировании ионосферы на разных несущих частотах позволяет определить показатель *p* спектра мелкомасштабной ионосферной турбулентности.

В то же время при известном значении параметра p можно определить степень анизотропии  $\alpha$  мелкомасштабных неоднородностей электронной концентрации ионосферной плазмы. Для этого достаточно измерить поперечники обратного рассеяния радиоволн при вертикальном и наклонном (ракурсном) зондировании одной и той же области ионосферы (см. (10)–(13)):

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} \propto \alpha^{-(p-1)}.$$
(15)

Наконец, для вычисленных значений параметров p и  $\alpha$  и измеренных величин поперечников обратного рассеяния радиоволн может быть определена структурная постоянная ионосферной турбулентности  $C_N$ .

Таким образом, одновременное радарное зондирование одной и той же области верхней ионосферы на различных частотах и при различных углах падения радиоволн даёт возможность определить все основные параметры анизотропного спектра мелкомасштабной ионосферной турбулентности.

Важно подчеркнуть, что энергетический потенциал радиолокаторов для вертикального зондирования должен быть достаточно высоким (например, как у локаторов стенда «Сура»), тогда как для случая ракурсного рассеяния радиоволн потенциал локатора может быть значительно ниже. Так, например, для колмогоровского спектра ионосферной турбулентности (p = 11/3) из соотношения (15) имеем  $\sigma_1/\sigma_2 \approx \alpha^{-3}$ . В условиях сильно анизотропных мелкомасштабных неоднородностей ионосферы с  $\alpha \approx 10 \div 100$  энергетический потенциал локатора ракусного рассеяния может быть на  $30 \div 60$  дБ ниже потенциала радиолокатора стенда «Сура».

Результаты радарных измерений интенсивности рассеянного в F-слое сигнала можно использовать для оценки величины дисперсии относительных флуктуаций электронной концентрации  $(\Delta N/N)_0^2$  в ионосфере. Здесь также важно знать показатель спектра p и степень вытянутости неоднородностей  $\alpha$ .

Как и раньше, будем полагать, что p = 11/3 и  $\alpha \approx 10 \div 100$ . Используем данные эксперимента, проведённого 20 мая 2010 года: мощность излучения радара стенда «Сура»  $P_0 = 200$  кВт, частота зондирования  $f_0 = 8,9$  МГц, длительность зондирующего импульса  $\tau = 300$  мкс, коэффициент направленного действия приёмопередающей антенны  $G_0 = 400$ , дальность до области рассеяния r = 300 км, средняя мощность принятого сигнала  $P_{\rm s} = 2 \cdot 10^{-12}$  Вт. В этом случае дисперсия электронной концентрации неоднородностей ионосферной плазмы составляет  $(\Delta N/N)_0^2 \approx 10^{-5} \div 10^{-2}$ .

Таким образом, дальнейший прогресс в исследованиях мелкомасштабной турбулентности верхней ионосферы методом обратного рассеяния коротковолновых сигналов может быть достигнут в результате комплексного эксперимента с одновременным измерением поперечника рассеяния вертикальным и наклонным (ракурсным) зондированием одной и той же области верхней ионосферы. Такой эксперимент позволит получить достоверную информацию об основных параметрах спектра мелкомасштабной турбулентности верхней ионосферы.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты измерений обратного рассеяния радиоволн и F-слое ионосферы с использованием радара на базе стенда «Сура». В 10 % случаев наблюдались радарные сигналы, рассеянные в области высот 300÷500 км. Обнаружено заметное изменение интенсивности радарных сигналов при модификации ионосферы мощными радиоволнами. Через 10÷15 с после выключения мощного радиопередатчика интенсивность сигнала, рассеянного на высотах F-слоя, уменьшалась на 10 дБ и достигала своего естественного уровня. Для сигналов, рассеянных неоднородностями на высотах 300÷700 км, значительной помехой могут стать сигналы возвратнонаклонного зондирования ионосферы. Именно поэтому радарные эксперименты должны сопровождаться работой ионозонда. Приведены оценки величины дисперсии относительных флуктуаций электронной концентрации для заданных параметров спектра анизотропных ионосферных неоднородностей.

Предложен модифицированный метод исследования мелкомасштабной турбулентности верхней ионосферы. Метод основан на одновременных измерениях поперечников обратного рассеяния коротких радиоволн при вертикальном и наклонном (ракурсном) зондировании ионосферной плазмы.

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зиничев В. А., Комраков Г. П., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 2. С. 128.
- 2. Зиничев В. А., Комраков Г. П., Митяков Н. А., Рапопорт В. О. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 1. С. 13.
- Кабанов И. Н., Осетров В. И. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: Сов. радио, 1965.
- 4. Сударушкин А. В., Афанасьев Н. Т. // Тр. 7 конф. молодых учёных «Взаимодействие полей излучения с веществом». Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2004. С. 137.
- Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Т. 2. М.: Наука, 1978.
- Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984.

Н. А. Митяков, В. А. Алимов, В. А. Зиничев и др.

336

Поступила в редакцию 31 мая 2010 г.; принята в печать 30 июня 2010 г.

# STUDY OF SMALL-SCALE TURBULENCE IN THE IONOSPHERIC F LAYER BY THE METHOD OF BACKSCATTERING OF SHORT RADIO WAVES

N. A. Mityakov, V. A. Alimov, V. A. Zinichev, G. P. Komrakov, and S. N. Mityakov

The signals of radio-wave backscattering from small-scale irregularities located at the altitudes from 200 to 400 km were first recorded by the "Sura" facility radar in 2006. The experiments with the "Sura" facility were repeated in the summer of 2009. Radar signals scattered in the altitude range 300–500 km were observed in 10% of the cases. Pronounced variation in the radar-signal intensity was observed during modification of the ionosphere by high-power radio waves. We discuss the possibility of an experimental study of the spectrum of small-scale turbulence in the upper ionosphere by the modified method of backscattering of HF waves.