

УДК 551.510.536

ИСКУССТВЕННЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ, ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ И СПОРАДИЧЕСКИЙ СЛОЙ E

Н. В. Бахметьева, В. В. Беликович, М. Н. Егерев, А. В. Толмачёва

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

В работе приведены новые результаты исследований искусственных периодических неоднородностей, создаваемых в ионосфере радиоизлучением мощного нагревного стенда «Сура» в период наблюдения спорадического слоя E . По результатам измерений скорости вертикального движения плазмы и профиля электронной концентрации в E -области ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственно созданной периодической структуре проанализирована возможность образования спорадического слоя E за счёт сгонки металлических ионов под действием вертикального сдвига скорости, возникающего на этих высотах вследствие распространения внутренних гравитационных волн. Сделаны оценки параметров этих волн, массы и концентрации металлических ионов в спорадическом слое E .

ВВЕДЕНИЕ

Неоднородные структуры, спорадические слои ионизации и волновые явления в нижней ионосфере в течение многих лет являются постоянным предметом как теоретических, так и экспериментальных исследований. Подтверждением этому служит обширная научная литература, посвящённая этим вопросам [1–5]. Среди высокоинформативных методов исследования нижней ионосферы важную роль играет метод, основанный на резонансном рассеянии радиоволн на искусственно создаваемых периодических неоднородностях ионосферной плазмы. Эти неоднородности, или своего рода ионосферные решётки, формируются в плазме в поле мощной стоячей радиоволны, образующейся в результате интерференции падающей на ионосферу и отражённой от неё волн [6, 7]. Измерение характеристик искусственных периодических неоднородностей проводится методом зондирования их пробными (слабыми, не возмущающими ионосферу) радиоволнами на стадии релаксации неоднородностей после прекращения нагрева. Рассеяние радиоволн на искусственных периодических неоднородностях обладает резонансными свойствами: когда волны от отдельных неоднородностей складываются синфазно, интенсивность рассеянных сигналов максимальна. Условием резонансного рассеяния является равенство длин волн, излучаемых нагревным, т. е. возмущающим ионосферу и создающим искусственные периодические неоднородности, и пробным передатчиками. На основе локации искусственных периодических неоднородностей пробными радиоволнами можно определять некоторые параметры ионосферы и нейтральной атмосферы, исследовать неоднородности ионизации, включая спорадический слой E (E_s), определять характеристики волновых движений и естественной турбулентности нижней ионосферы [7].

В [8, 9] была предложена методика определения концентрации металлических ионов в максимуме слоя E_s . Она основана на представлении о формировании спорадического слоя E из долгоживущих металлических ионов, измерении скорости вертикального движения плазмы и частотных характеристик слоя E_s . Последние определялись вначале из ионограмм вертикального зондирования. В дальнейшем использовался профиль электронной концентрации, определённый в экспериментах по созданию искусственных периодических неоднородностей практически одновременно на двух частотах, т. е. с двумя различными пространственными масштабами [10,

11]. Этот приём позволяет по результатам измерений времени релаксации рассеянного сигнала, которое зависит от частоты, используемой для создания искусственных периодических неоднородностей, независимо определять высотный профиль электронной концентрации в E -области ионосферы, температуру и плотность нейтральной компоненты. Кроме этого, осуществляя двухчастотное создание и локацию искусственных периодических неоднородностей, можно независимо определять вертикальную компоненту турбулентной скорости и коэффициент турбулентной диффузии, для чего использовать, когда это возможно, определённый тем же методом высотный профиль электронной концентрации.

В экспериментах по диагностике ионосферы методом искусственных периодических неоднородностей выяснилось, что спорадический слой E влияет на амплитуду и время релаксации рассеянного сигнала, что выражается в их иногда значительном увеличении на высоте слоя. Одной из причин роста времени релаксации является отличие массы положительных атомарных металлических ионов, в результате сгонки которых в магнитном поле под действием неоднородного по высоте ветра образуется слой E_s на средних широтах, от массы основных атмосферных ионов E -области NO^+ и O_2^+ . Это приводит к увеличению времени диффузионного расплывания неоднородностей. Метод и результаты определения молекулярной массы, т. е. сорта металлических ионов в слое E_s , представлены в [12, 13].

Важную роль в высотно-временных вариациях характеристик сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями, играют волновые и турбулентные движения. Они могут обеспечивать высотный градиент (сдвиг) вертикальной скорости, необходимый для формирования слоя E_s на определённой высоте [1–3]. В данной работе обсуждается влияние указанных факторов на характеристики рассеянных сигналов по результатам экспериментов, в которых создавались искусственные периодические неоднородности с двумя пространственными масштабами.

1. МЕТОДИКА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты по созданию искусственных периодических неоднородностей с двумя разными периодами по высоте проводились на базе нагревного стенда ФГНУ НИРФИ «Сура» ($56,1^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.) в дневные часы 4–6 октября 2006 года и 24–26 сентября 2007 года. Результаты исследований спорадического слоя E , полученные в октябрьском эксперименте 2006 года, а также профили электронной концентрации, полученные в этих измерениях двухчастотным методом, представлены в [11, 13, 14]. К недостаткам указанных измерений относится невозможность использования по техническим причинам данных о фазе рассеянного сигнала, которые применяются для определения скорости вертикального движения плазмы. В данной работе приведены результаты новых экспериментов 24–26 сентября 2007 года, в которых определялись вертикальные скорости плазмы.

Создание периодической структуры и её локация осуществлялись попеременно на частотах $f_1 = 4,7$ и $f_2 = 5,6$ МГц волнами необыкновенной поляризации. Поскольку передатчики стенда «Сура» не обладают возможностью быстрой перестройки, то для работы на частоте 5,6 МГц использовался один передатчик, а на частоте 4,7 МГц синфазно работали два передатчика, каждый на свою секцию антенны. В результате эффективная мощность воздействия на частоте 4,7 МГц составляла порядка 70 МВт, а на частоте 5,6 МГц — 15 МВт. Воздействие на ионосферу производилось поочерёдно: в одном сеансе на частоте 4,7 МГц, а в следующем — на частоте 5,6 МГц. Продолжительность одного сеанса измерений составляла 15 с. Таким образом, в течение минуты осуществлялось по два сеанса нагрева на каждой частоте. Каждый сеанс начинался с непрерывного излучения передатчиков стенда в течение трёх секунд для создания искусственных перио-

дических неоднородностей. Затем передатчик (или два передатчика) переводились в импульсный режим (режим пробных волн) и излучали импульсы с длительностью 30 мкс и частотой повторения 50 Гц. Пробные радиоволны рассеивались на искусственных периодических неоднородностях и принимались диагностической установкой. В качестве последней использовалась установка для исследования ионосферы методом частичных отражений, антенная система которой состоит из 12 вибраторов на каждой из двух линейных поляризаций. Принятые сигналы усиливались приёмниками с полосой пропускания 40 кГц, оцифровывались 12-разрядным аналого-цифровым преобразователем и в виде синусной и косинусной составляющих записывались в отдельный файл с шагом по высоте 1,4 км. На каждой высоте для каждого момента времени рассчитывались амплитуда и фаза рассеянного сигнала. Временная зависимость амплитуды A аппроксимировалась функцией вида $\ln A(t) = \ln A_0(t) - t/\tau$. Здесь τ — время релаксации рассеянного сигнала, которое характеризует время жизни искусственных периодических неоднородностей после прекращения нагрева, т. е. то время, за которое амплитуда рассеянного сигнала убывает в e раз. Временные вариации фазы φ рассеянного сигнала аппроксимировались зависимостью $\varphi(t) = \varphi_0 + bt$, где $b = 4\pi V/\lambda$, $V = [\lambda/(4\pi)] d\varphi/dt$ — скорость вертикального движения плазмы, λ — длина мощной волны в среде. Положительные значения скорости соответствуют движению вниз [7].

Особенностью ионосферных условий в период измерений было существование спорадического слоя E как на типичных высотах около 100÷110 км, так и на высотах 90÷95 км. На этих высотах образуются так называемые подслои спорадические слои E , т. е. слои, расположенные ниже максимума E -области. Ионосферные условия в период экспериментов контролировались автоматической ионосферной станцией «Базис», с помощью которой каждые 5÷10 минут снимались ионограммы вертикального зондирования. На ионограммах в октябре 2006 года на высоте 100 км часто регистрировался спорадический слой E типа l (low) с предельной частотой отражения до 3,5 МГц, часто с магнитоионным расщеплением. В сентябре 2007 года также наблюдались спорадические слои на высоте порядка 100 км с предельной частотой отражения до 4 МГц. Около 14 часов 26 сентября 2007 года в течение 25 минут регистрировался спорадически слой E , действующая высота которого уменьшалась со 110 до 100 км с последующим увеличением до прежних значений, после чего слой пропал. Так выглядят на записях слои, образовавшиеся не над точкой наблюдения (над головой наблюдателя), а входящие в диаграмму направленности приёмной антенны со стороны. Критические частоты слоя F_2 в дни измерений, как правило, были выше, чем вторая рабочая частота 5,6 МГц, что обеспечивало отражение нагревной и пробной радиоволн от ионосферы и создание интенсивных искусственных периодических неоднородностей на обеих частотах. Но 26 сентября 2007 года в течение почти половины интервала наблюдений частота 5,6 МГц приближалась к критической частоте слоя F_2 , что уменьшало уровень сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями, на этой частоте.

2. ВЫСОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

На рис. 1 в координатах действующая высота—время представлены яркостные записи амплитуды рассеянного сигнала за 24 и 26 сентября 2007 года с 12:30 до 16:00 MSK на частотах 4,7 и 5,6 МГц. Рисунки 1а, б относятся к результатам измерений 24 сентября, а рис. 1в, г — 26 сентября. На этих рисунках в диапазоне высот $h = 50\div 85$ км видны сигналы, рассеянные искусственными периодическими неоднородностями в D -области, в диапазоне $h = 90\div 120$ км — в E -области, и сигналы от спорадического слоя E , на высотах от 250 км — сигналы, отражённые от слоя F_2 . Амплитуда последних превышает 70 дБ. Отметим, что величина 70÷74 дБ характеризует границу динамического диапазона приёмника, а 15÷30 дБ соответствует уровню естественных помех.

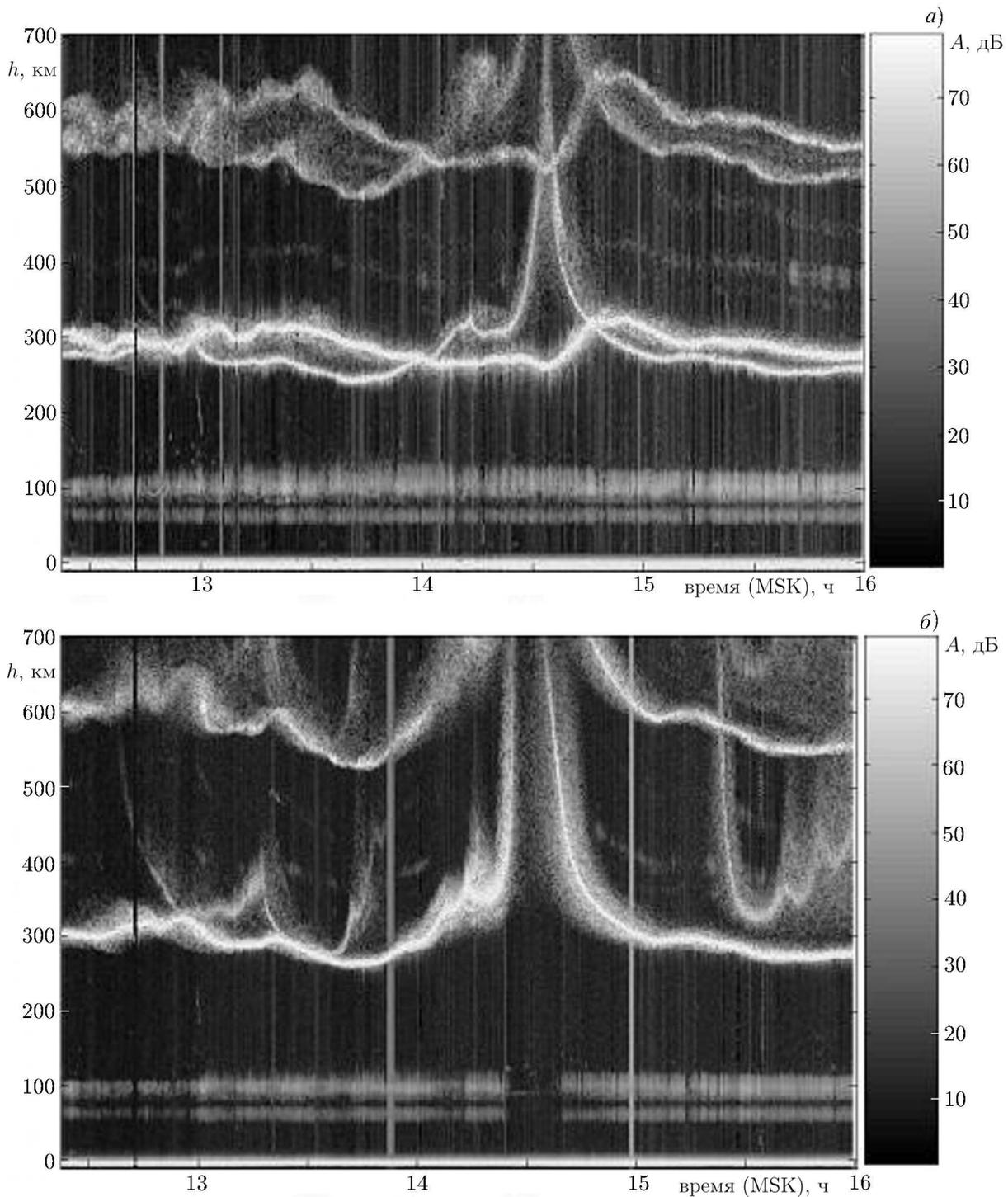


Рис. 1. Яркие записи амплитуды сигналов, рассеянных искусственными периодическими неоднородностями, на частоте 4,7 МГц (*а, в*) и на частоте 5,6 МГц (*б, г*) для измерений 24 сентября 2007 года (*а, б*) и 26 сентября 2007 года (*в, г*)

Выше 500 км видны кратные отражения от области *F*. В *D*- и *E*-областях наблюдались более слабые сигналы с амплитудой до 50 дБ. На рис. 1*а* и *в*, относящихся к частоте 4,7 МГц, видны ослабленные сигналы другой частоты из-за неполной развязки частотных каналов приёмника

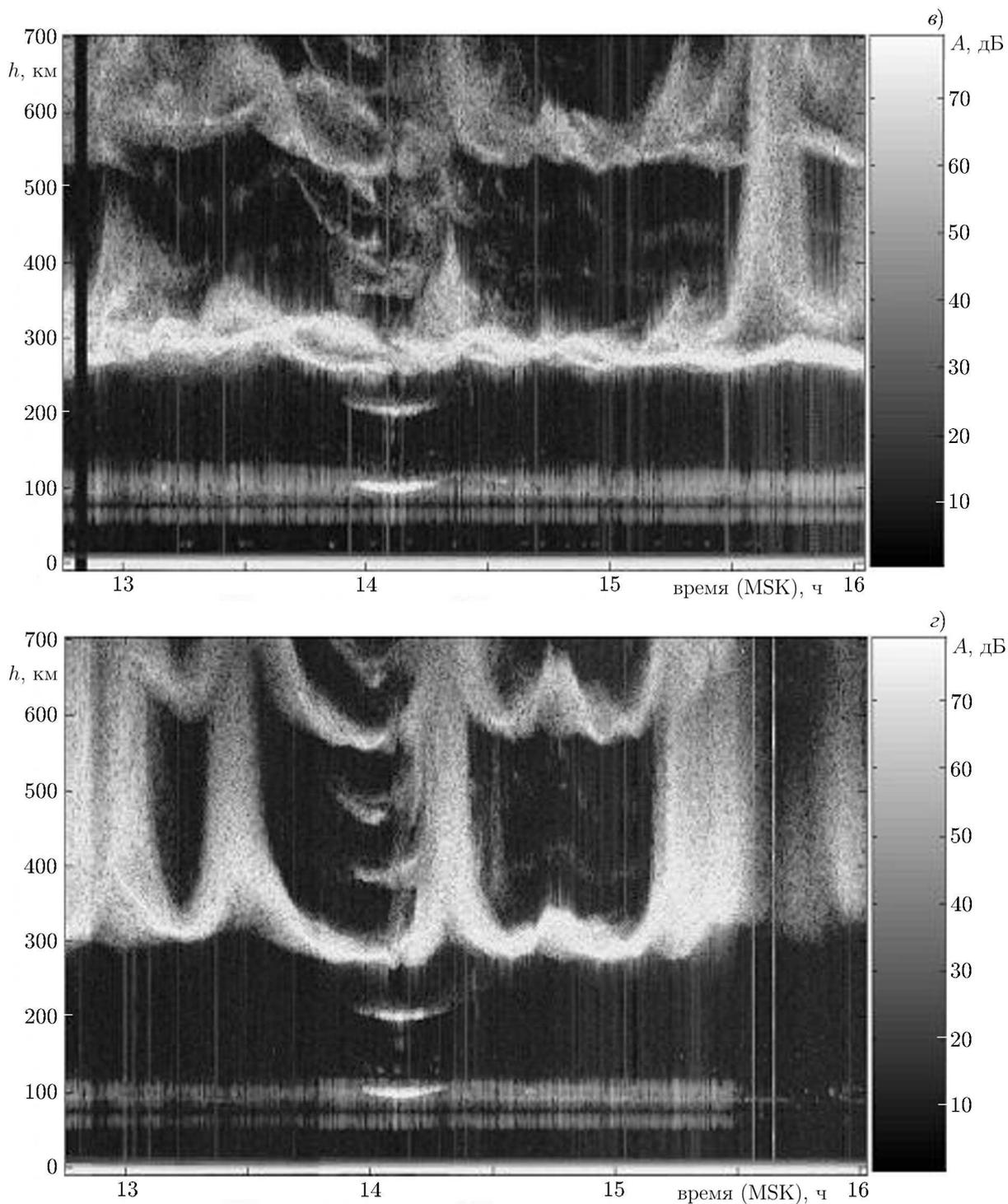


Рис. 1. (продолжение)

вследствие высокого уровня сигнала. Резкий рост действующей высоты рассеянного сигнала в некоторые интервалы времени свидетельствует о том, что временами частота зондирования приближалась и даже становилась больше критической частоты F -слоя. Кроме спорадического слоя, почти всегда наблюдавшегося на высоте около 100 км, на рис. 1в, г виден спорадический слой E (в

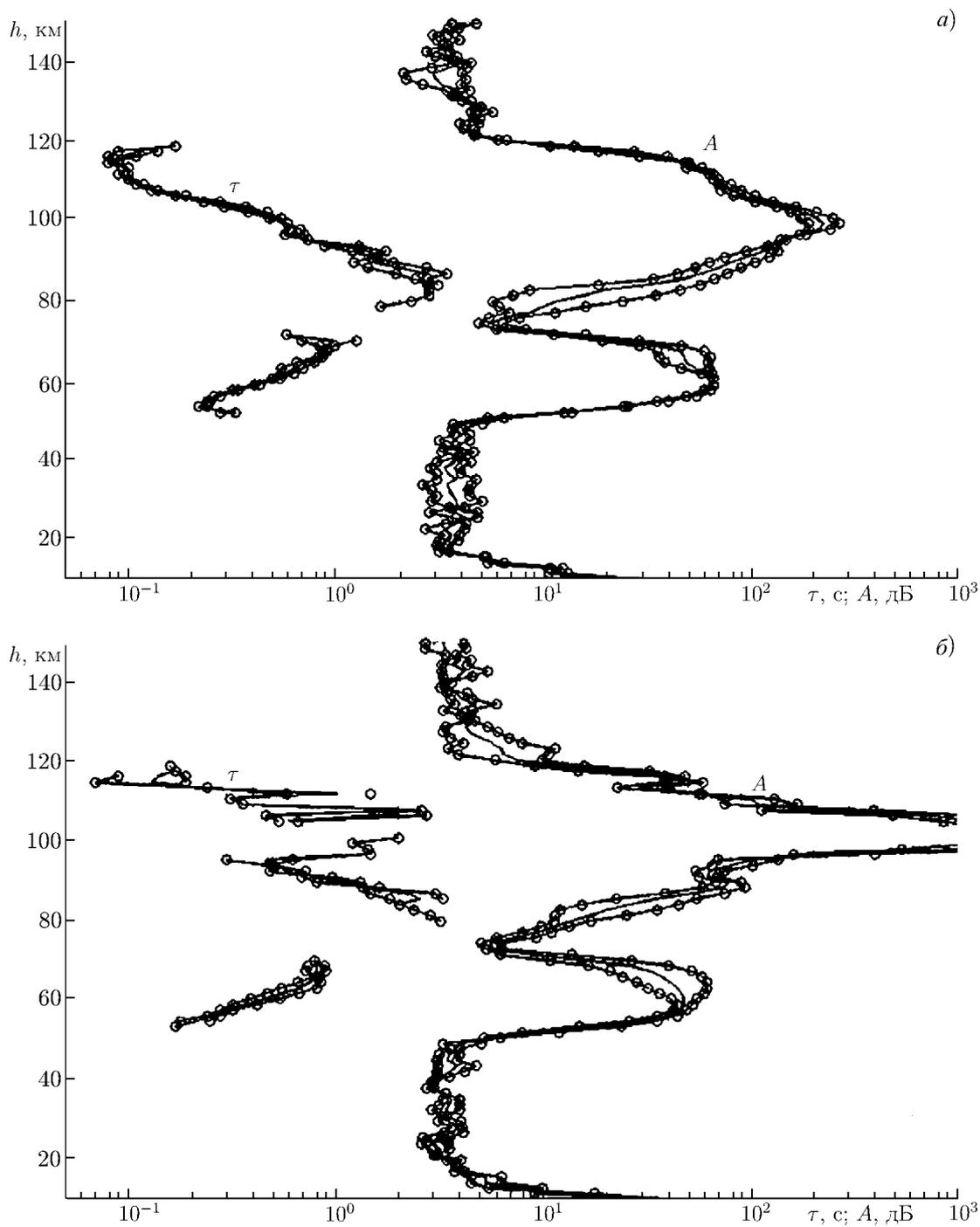


Рис. 2. Высотные профили времени релаксации τ (слева) и амплитуды рассеянного сигнала A (справа) на частоте 5,6 МГц за 26.09.2007 в сеансе 13:50 MSK (а) и в сеансе 14:12 MSK (б). Линиями с точками показаны «мгновенные» реализации, сплошными чёрными линиями изображены их усреднённые за минуту значения

виде горизонтального серпика), пришедший со стороны, и многочисленные кратные отражения от него. Амплитуда рассеянного сигнала от этого слоя превышала 70 дБ.

Особенностью экспериментов по исследованию искусственных периодических неоднородно-

стей является возможность регистрации быстрых вариаций амплитуды и времени релаксации рассеянного сигнала с характерным временем не более 15 с, а также их сравнительно медленных квазипериодических вариаций с характерными периодами, соответствующими периодам внутренних гравитационных волн. Высотный шаг регистрации данных, равный 1,4 км, благодаря резонансному характеру рассеяния позволяет изучать тонкие эффекты расслоений E -области [7].

На рис. 2а, б представлены высотные профили времени релаксации $\tau(h)$ и амплитуды рассеянного сигнала $A(h)$ на частоте 5,6 МГц в сеансах 13:52 и 14:12 MSK соответственно за 26 сентября 2007 года. Последний сеанс относится к периоду времени, когда наблюдался движущийся спорадический слой. Линиями с точками показаны «мгновенные» реализации времени релаксации и амплитуды рассеянного сигнала, а сплошными чёрными линиями изображены их усреднённые за минуту значения. Характер высотных профилей амплитуды и времени релаксации типичен для сигналов, рассеянных искусственными периодическими неоднородностями. Так, в интервале высот 85÷100 км (см. рис. 2а) с ростом действующей высоты происходит убывание времени релаксации в целом по экспоненциальному закону, что согласуется с механизмом релаксации искусственных периодических неоднородностей на этих высотах, обусловленным процессом амбиполярной диффузии [7]. На высотном профиле $\tau(h)$ видны три локальных максимума на действующих высотах вблизи 100; 90 и 85 км. Максимумы на высотах 90 и 100 км, которые есть и на профиле $A(h)$, обусловлены наличием на этих высотах спорадического слоя E [13]. Ниже 85 км наблюдается уменьшение времени релаксации рассеянных сигналов, что связано с турбулентными явлениями [7, 13], которые разрушают периодическую структуру и уменьшают время жизни неоднородностей. Небольшое увеличение амплитуды вблизи высоты 110 км обусловлено максимумом электронной концентрации в E -области. В D -области время релаксации с высотой возрастает, что связано с другим механизмом образования и релаксации искусственных периодических неоднородностей, обусловленным температурной зависимостью коэффициента прилипания электронов к молекулам кислорода при тройных соударениях [7, 15]. Выше 75÷78 км происходит уменьшение τ и резкое падение амплитуды рассеянного сигнала до уровня помех, которое связано с ростом скорости отлипания электронов от отрицательных ионов вследствие увеличения на этих высотах концентрации атомарного кислорода. Отметим, что высота, на которой происходит резкое уменьшение амплитуды и времени релаксации, соответствует нижней границе области, обогащённой атомарным кислородом [15].

На рис. 2б около 14 часов резкое возрастание амплитуды и времени релаксации рассеянного сигнала на высотах 100÷110 км обусловлено двигавшимся горизонтально спорадическим слоем E .

По измерениям фазы рассеянного сигнала в случае, когда её временная зависимость хорошо аппроксимировалась линейной функцией, для сентябрьского эксперимента 2007 года получены высотные профили скорости вертикального движения плазмы и её высотный градиент dV/dh . Пример характерного высотного профиля скорости $V(h)$ в сеансе 14:09 MSK 24 сентября 2007 года, усреднённого по двум минутам, для действующих высот 85÷115 км приведён на рис. 3. Здесь крестиками отмечены два минутных (усреднённых за минуту) профиля скорости, а сплошной линией — усреднённая за две минуты зависимость $V(h)$. На рис. 3 отражён также волнообразный характер изменений скорости вертикального движения. Период изменения скорости по вертикали составляет 15 км. Вблизи высот 100 и 112 км происходит смена знака скорости. Ниже 95 км минутные реализации скорости вертикального движения отличаются друг от друга, что обусловлено турбулентными процессами в нижней части E - и верхней части D -областей.

В целом по результатам измерений фазы рассеянного сигнала скорость вертикального движения плазмы определялась в интервале высот 50÷120 км. В этом интервале она совпадает со скоростью движения нейтральной компоненты. Выделено два интервала высот с наименьшим разбросом скорости: в D -области это высоты 60÷80 км, в E -области — высоты 95÷110 км.

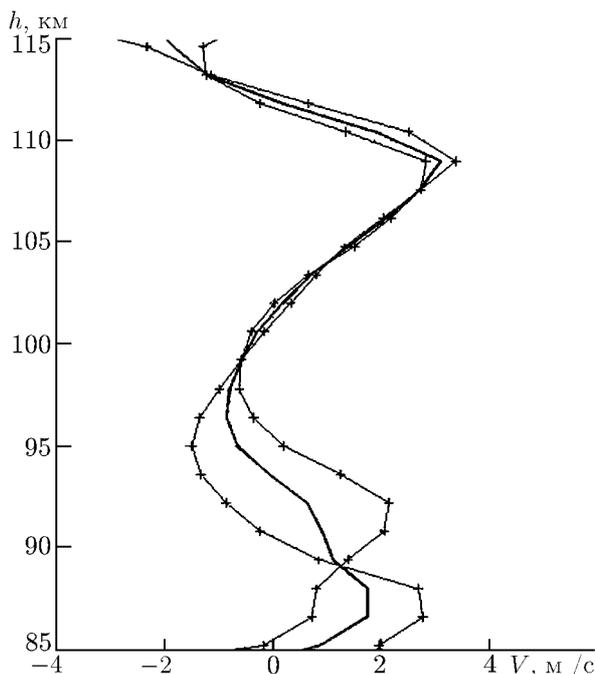


Рис. 3. Высотные профили скорости вертикального движения плазмы, полученные по измерениям фазы рассеянного сигнала на частоте 4,7 МГц в сеансе 14:09 MSK 24.09.2007. Отмеченные крестиками тонкие линии соответствуют двум минутным измерениям, жирная линия — усреднённый профилю скорости

и сглаженные методом скользящего среднего, а на рис. 5 — зависимость скорости V вертикального движения плазмы по данным на частоте 4,7 МГц.

На рис. 4а видно, что со временем амплитуда рассеянного сигнала растёт от 20 до 73 дБ, падая к концу наблюдений до уровня помех (12÷15 дБ). Временные вариации амплитуды рассеянного сигнала связаны в основном с изменением во времени ионосферных параметров, главным образом электронной концентрации N_e , а также температуры T и плотности ρ нейтральной атмосферы [7]. Около 14 часов (на рис. 4а это время соответствует отметке 80 минут) наблюдается значительный рост амплитуды рассеянного сигнала с последующим уменьшением до значений, обычных для рассеяния на искусственных периодических неоднородностях, что, как говорилось выше, связано с прохождением через пункт наблюдения интенсивного спорадического слоя E с предельной частотой отражения до 7 МГц. Из рис. 4б следует, что время релаксации τ уменьшалось с 2,6 с на высоте 90 км до 0,1 с на высоте 108 км, а его временные вариации имели квазипериодический характер с наиболее заметным периодом около 30 минут. Прохождение спорадического слоя E отразилось на рис. 4б в соответствующем росте времени релаксации.

На рис. 5 представлена зависимость скорости V вертикального движения плазмы от времени на высоте 100,3 км по данным на частоте 4,7 МГц, сглаженная методом скользящего среднего по интервалу 8 минут. Аналогичные вариации скорости на других высотах не приведены, чтобы не загромождать рисунок. Усреднённые за минуту значения скорости на высотах 90÷108 км изменялись, как правило, в интервале от -5 до 6 м/с (напомним, что положительные значения V соответствуют движению вниз), а средние за сеанс наблюдений скорости по модулю не превышали 1 м/с.

В интервале высот 85÷95 км разброс вариаций скорости резко возрастает вследствие влияния турбулентности. Наблюдался квазипериодический (с периодом от 5÷7 км 24.09.2007 до 15 км 26.09.2007 характер изменения вертикальной скорости с высотой. Высотный градиент (сдвиг) вертикальной скорости на высотах 80÷120 км составил от $(1\div 8) \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ до $4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Согласно [3, 9, 13] такой сдвиг скорости способен обеспечить образование спорадического слоя E путём сгонки металлических ионов под действием ионосферного ветра.

Особое внимание при обработке результатов исследований ионосферы методом искусственных периодических неоднородностей уделяется анализу временных зависимостей характеристик рассеянного сигнала.

В результате эксперимента 24 и 26 сентября 2007 года были получены и проанализированы высотно-временные зависимости амплитуды и времени релаксации рассеянного сигнала, а также скорости вертикального движения плазмы. На рис. 4 для примера приведены высотно-временные зависимости амплитуды A и времени релаксации τ рассеянного сигнала, полученные 26 сентября при измерениях на частоте 5,6 МГц и

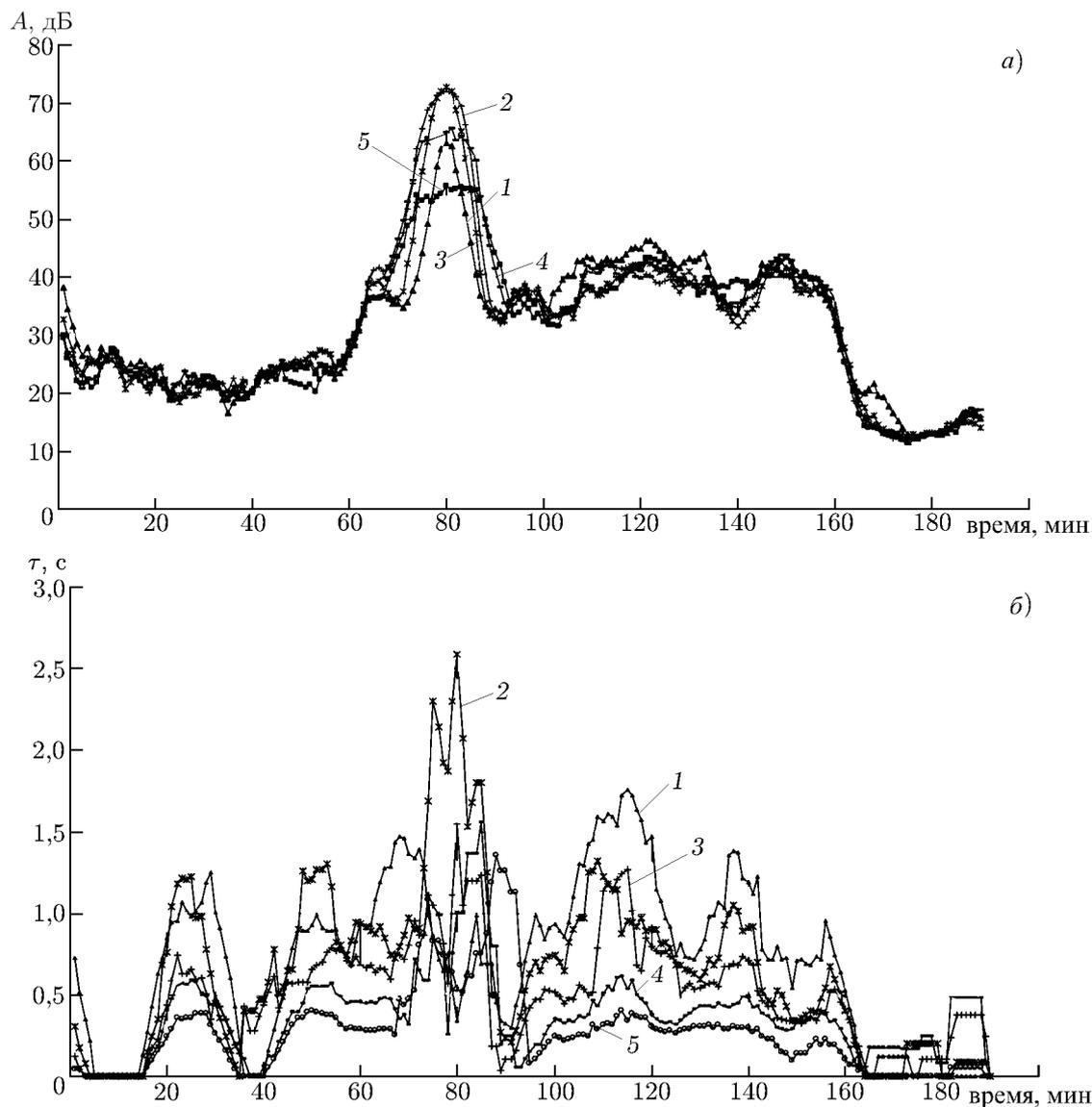


Рис. 4. Зависимости амплитуды рассеянного сигнала от времени для измерений 26.09.2009 на частоте 5,6 МГц для действующих высот в интервале от 93,6 км до 104,8 км, сглаженные методом скользящего среднего по интервалу 8 минут (а); то же для времени релаксации рассеянного сигнала (б): кривая 1 соответствует 93,6 км, 2 — 96,4 км, 3 — 99,2 км, 4 — 102,0 км, 5 — 104,8 км

В целом, приведённые величины и характер временных вариаций рассеянного сигнала соответствуют результатам измерений 24 сентября 2007 года.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ИОНОВ, ПРЕОБЛАДАЮЩИХ В СПОРАДИЧЕСКОМ СЛОЕ E, И КОНЦЕНТРАЦИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И АТМОСФЕРНЫХ ИОНОВ

На средних широтах спорадический слой E образуется за счёт перераспределения плазмы (ионов и электронов) в магнитном поле Земли под действием горизонтальных ветров, обладающих градиентами величины скорости по высоте [1–3]. Положительные долгоживущие ионы, а за

ними и электроны, накапливаются на высоте, где скорость ветра меняет знак. В дневных условиях такими ионами являются атомарные металлические ионы Na^+ , Ca^+ , K^+ , Mg^+ , Fe^+ и Si^+ . Последний хотя и не является металлом, но также представляет собой долгоживущий атомарный ион и регистрируется в спорадических слоях [4, 5]. В работах [12, 13] нами был предложен способ оценки масс преобладающих ионов в слое E_s , а в [8, 9] — концентраций всех металлических и молекулярных ионов NO^+ и O_2^+ — основных атмосферных ионов на высотах E -области в отсутствие спорадических слоёв.

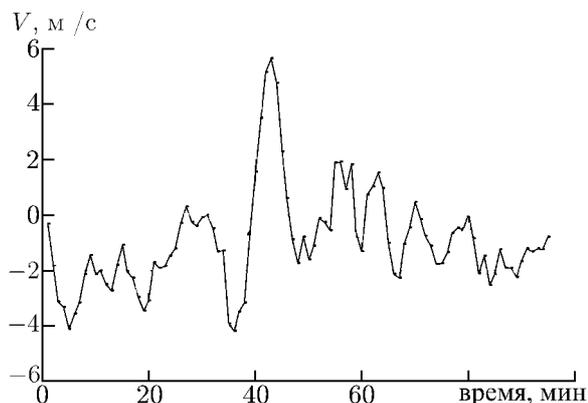


Рис. 5. Зависимость скорости V вертикального движения плазмы от времени, сглаженная методом скользящего среднего по интервалу 8 минут, по данным на частоте 4,7 МГц для действующей высоты 100,3 км

же отличия частот ион-нейтральных соударений для металлических и атмосферных ионов. Тогда для отношения времён релаксации на высоте спорадического слоя E (τ_{E_s}) и фоновой E -области (τ) получим выражение [13]

$$\frac{\tau_{E_s}}{\tau} = \left(\frac{n_E}{n_{E_s}} \right)^2 \left(\frac{M_m \nu_{im}^M}{M_a \nu_{im}^a} \right), \quad (2)$$

где ν_{im}^M и ν_{im}^a — частоты соударений с нейтральными молекулами металлических и атмосферных ионов соответственно, а M_m и M_a — их массы, n_{E_s} — показатель преломления в слое E_s , n_E — показатель преломления в E -области. Таким образом, измеряя в эксперименте времена релаксации искусственных периодических неоднородностей при наличии слоя E_s и без него, используя для расчёта показателя преломления профиль электронной концентрации, измеренный двухчастотным методом создания искусственных периодических неоднородностей, а также рассчитанные высотные зависимости частот соударений металлических и атмосферных ионов с нейтральными молекулами, оцениваем массы ионов металла, преобладающих в слое.

Высотная зависимость частоты соударений разных сортов ионов с нейтральными молекулами определялась по формуле [16]

$$\nu_{im} = \left[\frac{1,8}{\sqrt{A(A+28)}} n_{\text{N}_2} + \frac{1,83}{\sqrt{A(A+32)}} n_{\text{O}_2} + \frac{0,91}{\sqrt{A(A+16)}} n_{\text{O}} \right] 10^{-14}.$$

Здесь A — массовое число атомарного иона, а концентрации нейтральных компонент N_2 , O_2 и O для 24 сентября 2007 года взяты из модели нейтральной атмосферы MSIS-90 [17]. В итоге для

Оценка масс ионов, преобладающих в спорадическом слое E , проводится в предположении диффузионного механизма релаксации искусственных периодических неоднородностей [7]. Диффузионное время их релаксации τ пропорционально молекулярной массе преобладающих ионов M и выражается соотношением

$$\tau = \frac{1}{K^2 D_a} = \frac{M \nu_{im}}{k (T_{e0} + T_{i0}) K^2}, \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана, $K = 4\pi/\lambda$ — волновое число стоячей волны, $\lambda = \lambda_0/n$, λ_0 — длина волны в вакууме, n — показатель преломления, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии, M — молекулярная масса ионов, T_{e0} и T_{i0} — невозмущённые значения электронной и ионной температур, ν_{im} — частота столкновений ионов с нейтральными молекулами. Надо учитывать также

Таблица 1. Результаты определения концентрации металлических ионов в слое E_s

Сеанс наблюдений	$N_s, \text{см}^{-3}$	$N_M, \text{см}^{-3}$	$N_0, \text{см}^{-3}$	N_M/N_s	N_s/N_0
14:45 MSK 26.09.2009	$1,201 \cdot 10^5$	$7,212 \cdot 10^4$	$8,031 \cdot 10^4$	0,89	1,49
13:55 MSK 26.09.2009	$1,392 \cdot 10^5$	$2,473 \cdot 10^4$	$1,212 \cdot 10^5$	0,18	1,16
13:31 MSK 24.09.2009	$1,073 \cdot 10^5$	$1,904 \cdot 10^4$	$1,101 \cdot 10^5$	0,18	1,07

высоты 100 км получены значения масс ионов $M_m = 58$ и 44 , которые близки к массам Fe^+ и Ca^+ . Для определения молекулярной массы положительных металлических ионов на высоте спорадического слоя E мы воспользовались профилями электронной концентрации в спорадическом слое и фоновой E -области, определёнными двухчастотным способом по методике [10, 11].

На рис. 6 приведён пример профиля электронной концентрации для сеанса 13:30 MSK 24.07.2009, на котором на высоте 101 км виден слабый спорадический слой E с электронной концентрацией $N_s = 1,07 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, а максимум концентрации с величиной $1,48 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ соответствует максимуму E -области. Величина электронной концентрации в E -области на высоте слоя E_s составила $N_0 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, т. е. профиль $N_e(z)$ на рис. 6, где z — истинная высота, отражает существование достаточно слабого слоя E_s , который, тем не менее, обеспечил возрастание времени релаксации рассеянного сигнала до $\tau_{E_s} = 1,14$ с по сравнению с диффузионным временем релаксации $\tau = 0,84$ с.

Приведённые выше сведения достаточны для определения концентрации металлических ионов в слое E_s согласно методике, разработанной авторами ранее и подробно описанной в [8, 9]. Не останавливаясь на ней специально, отметим только, что методика основана на предположении о преобладающей роли атмосферных ионов в фотохимических процессах в E -области и использует экспериментальные данные о скоростях вертикальных движений плазмы и электронной концентрации как в области E , так и в спорадическом слое, полученные методом рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях. Концентрации атмосферных (N_A) и металлических (N_M) ионов определяются выражениями

$$N_A = N_0^2/N_s - \alpha_0^{-1} dV/dh, \quad N_M = N_s [1 - (N_0/N_s)^2] + \alpha_0^{-1} dV/dh,$$

где α_0 — коэффициент диссоциативной рекомбинации атмосферных ионов, а N_s и N_0 — значения электронной концентрации в максимуме слоя E_s и в E -области на высоте спорадического слоя соответственно. Для оценок концентраций ионов необходимо одновременно измерять профиль электронной концентрации и высотную зависимость скорости вертикального движения плазмы. В табл. 1 приведены результаты расчётов для трёх сеансов наблюдений спорадического слоя E , в которых высотный градиент вертикальной скорости составил $dV/dh = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, концентрация металлических ионов на высоте спорадического слоя E могла составлять от 18 до 90 % от концентрации всех положительных ионов, включая атмосферные, которая в силу условия квазинейтральности равна электронной концентрации N_s . Этот результат

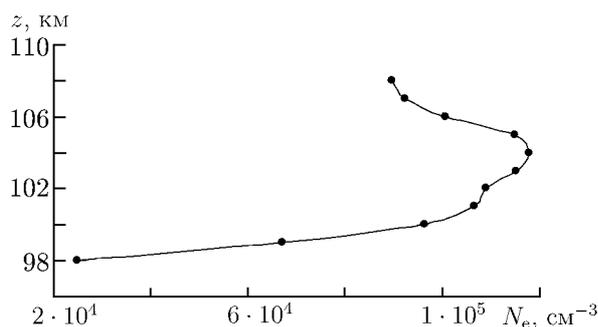


Рис. 6. Пример высотного профиля электронной концентрации $N_e(z)$, полученный двухчастотным методом создания искусственных периодических неоднородностей в сеансе 13:30 MSK 24.07.2009. На высоте 101 км имеется локальный максимум, обусловленный спорадическим слоем E , максимум на высоте 104 км соответствует максимуму концентрации в E -области

соответствует прямым ракетным измерениям доли металлических ионов в спорадических слоях E [4, 5].

4. ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ И СПОРАДИЧЕСКИЙ СЛОЙ E

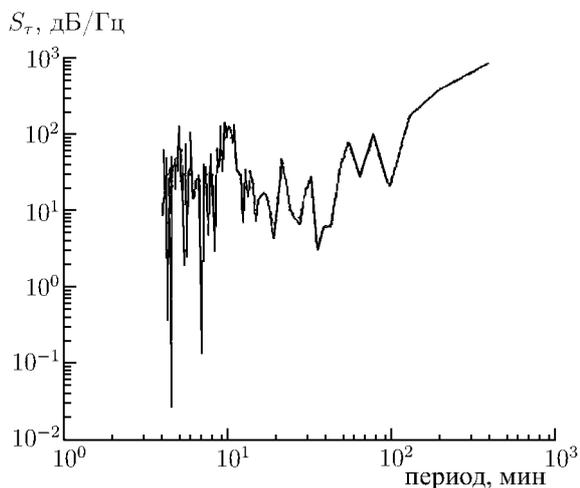


Рис. 7. Пример спектральной плотности мощности S_T времени релаксации рассеянного сигнала для 24.09.2007, рассчитанной для действующей высоты 106 км

Волнообразные вариации характеристик рассеянного сигнала, которые хорошо видны на рис. 1–5, на высотах нижней ионосферы, наиболее вероятно, обусловлены прохождением внутренних гравитационных волн (ВГВ) [18, 19]. Для того, чтобы выделить частоты (периоды) волн, вносящие основной вклад в динамику этих характеристик, были рассчитаны спектры мощности амплитуды, времени релаксации и скорости вертикального движения плазмы. Спектральная плотность мощности рассчитывалась методом быстрого преобразования Фурье [20] по временной реализации соответствующей характеристики сигнала. Пример спектра времени релаксации рассеянного сигнала 24 сентября 2007 года, рассчитанный для действующей высоты 106 км, приведён на рис. 7. Спектральный анализ показал, что временные вариации времени релаксации, амплитуды рассеянного сигнала и вертикальной скорости содержат колебания с периодами $5 \div 10$ минут, $15 \div 20$ минут, 30 минут, 45 минут и до 180 минут. Такие периоды характерны для внутренних гравитационных волн. Наибольшую интенсивность в спектре имели, как правило, получасовой и часовой периоды. Период 8 минут на рис. 6 соответствует наивысшей частоте ВГВ — частоте Брента–Вяйсяля, вблизи которой часто происходит рост спектральной плотности [18]. В целом характер спектров характеристик рассеянного сигнала соответствует результатам аналогичных исследований скорости вертикальных движений, проведённых авторами в 90-е годы [7].

Таким образом, по результатам наблюдений искусственных периодических неоднородностей можно сделать вывод о том, что волновые движения в атмосфере проявляются во всех характеристиках рассеянного сигнала и имеют высотный и временные периоды, характерные для внутренних гравитационных волн. Пока не объяснены до конца очень быстрые (с характерным временем порядка 15 с) вариации рассеянного сигнала, зарегистрированные на всех высотах. Вероятно, ветровой сдвиг скорости вертикального движения плазмы, необходимый для образования слоя E_s , обеспечивается распространением волн [7]. Как отмечалось выше, на высотах $90 \div 120$ км создавался градиент скорости не менее $dV/dh = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, достаточный для сгонки металлических ионов на определённой высоте и образования спорадических слоёв, хорошо наблюдаемых на ярких записях рассеянного сигнала. Поскольку высота образования спорадического слоя E соответствует высоте смены знака вертикальной скорости, можно полагать, что наблюдавшиеся слои могли образоваться за счёт перераспределения металлических ионов, что в очередной раз свидетельствует в пользу теории ветрового сдвига, объясняющей образование слоя E_s на средних широтах.

Для измерений 26 сентября 2007 года была оценена эффективная скорость движения спорадического слоя E , который наблюдался на яркостной записи в период с 13:55 до 14:20 MSK. Судя по всему, этот слой образовался в стороне на некотором расстоянии от приёмного пункта и, двигаясь горизонтально, прошёл через диаграмму направленности приёмно-регистрирующего комплекса (рис. 1в, г). Симметричный во времени характер яркостной записи рассеянного сигнала свидетельствует в пользу горизонтального движения слоя, а не в пользу его снижения с некоторой высоты, как бывает, например, при прохождении перемещающихся ионосферных возмущений [3, 21]. Скорость перемещения слоя составила порядка $20 \div 25$ м/с. Если учесть, что раскрыв диаграммы направленности приёмной антенны по уровню половинной мощности составляет 45° , то на высоте 100 км он соответствует освещаемой диаграммой области с протяжённостью 83 км. По продолжительности наблюдения проходящего спорадического слоя можно было оценить протяжённость «спорадического облака», прошедшего через диаграмму, которая составила $45 \div 50$ км. В среднем горизонтальные размеры слоя E_s составляют $100 \div 300$ км, увеличиваясь иногда до 1000 км, но часто наблюдаются и сравнительно небольшие слои (от 20 км) [1–3], подобные наблюдавшемуся нами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диагностики нижней ионосферы методом создания искусственных периодических неоднородностей с двумя пространственными масштабами получены новые данные по влиянию спорадического слоя E на вариации амплитуды и времени релаксации сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями ионосферной плазмы. Выявлен волнообразный характер этих вариаций, определены основные периоды, влияющие на характеристики сигнала. Периоды от $5 \div 10$ до 180 минут, определённые по спектрам мощности измеренных в эксперименте амплитуды, времени релаксации рассеянного сигнала и скорости вертикального движения плазмы, близки к характерным периодам ВГВ. Определённый по результатам измерений высотный градиент вертикальной скорости с величиной не менее 10^{-4} с^{-1} является достаточным для сгонки металлических ионов в спорадический слой, расположенный на высоте, где вертикальная скорость меняет знак. Сделаны оценки масс металлических ионов, преобладающих в спорадическом слое E , на основе измерения времени релаксации рассеянного сигнала и реальных профилей электронной концентрации, полученных двухчастотным методом создания искусственных периодических неоднородностей. Зарегистрированы движущиеся спорадические слои, сделаны оценки их размеров и скорости движения. Продемонстрирована возможность изучения комплекса явлений в нижней ионосфере новым методом создания искусственных периодических неоднородностей на двух частотах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08–02–97036 и 09–05–00450).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Whitehead J. D. // J. Atm. Terr. Phys. 1989. V. 51, No 5. P. 401.
2. Mathews J. D. // J. Atm. Terr. Phys. 1998. V. 60, No 4. P. 413.
3. Гершман Б. Н., Игнатъев Ю. А., Каменецкая Г. Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя на различных широтах. М.: Наука, 1976. 108 с.
4. Earle G. D., Kane T. J., Pfaff R. F., Bounds S. R. // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, No. 4. P. 461.
5. Roddy P. A., Earle G. D., Svenson C. M., et al. // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31. Art. no. L19808.

6. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1975. Т. 22, вып. 10. С. 497.
7. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Толмачёва А. В., Бахметьева Н. В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. 155 с.
8. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Игнатъев Ю. А., Понятов А. А. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1996. Т. 36, № 6. С. 36.
9. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Игнатъев Ю. А., Понятов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 37, № 1. С. 26.
10. Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Калинина Е. Е., Толмачёва А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 9. С. 744.
11. Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Бубукина В. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 6. С. 477.
12. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Каган Л. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 757.
13. Бахметьева Н. В., Беликович В. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 956.
14. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Толмачёва А. В. // Труды 22 Всерос. конф. по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону, 2008. Т. 2. С. 129.
15. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29, № 11. С. 1283.
16. Banks D. F., Kockarts G. *Aeronomy. Part A*. New York: Academic Press inc., 1973.
17. http://omniweb.gsfc.nasa.gov/cgi/vitmo_model.cgi.
18. Хайнс К. О. // Термосферная циркуляция. М.: Мир, 1975. С. 85.
19. Гершман Б. Н., Григорьев Г. И. // Ионосферные исследования. 1978. № 25. С. 5.
20. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982. 428 с.
21. Шарадзе З. С. Явления в ионосфере средних широт, связанные с атмосферными волнами: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Тбилиси, 1990. 475 с.

Поступила в редакцию 19 февраля 2010 г.; принята в печать 28 марта 2010 г.

ARTIFICIAL PERIODIC IRREGULARITIES, WAVE PHENOMENA IN THE LOWER IONOSPHERE, AND THE SPORADIC *E* LAYER

N. V. Bakhmet'eva, V. V. Belikovich, M. N. Egereva, and A. V. Tolmacheva

We present new results of studying the artificial periodic irregularities produced in the ionosphere by the radio emission of the high-power heating facility “Sura” during the period of observations of the sporadic E layer. Basing on the measurement results for the velocity of the vertical plasma motion and the electron profile density in the E region of the ionosphere, which were obtained by the method of resonance scattering of radiowaves on an artificially produced periodic structure, the possibility to produce a sporadic E layer by driving metal ions affected by the vertical shift of the velocity, which occurs at these altitudes due to the propagation of internal gravity waves. The parameters of these waves are evaluated, as well as the mass and concentration of metal ions in the sporadic E layer.