

УДК 550.388.2+551.510.536

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТЫ СОУДАРЕНИЙ ИОНОВ С МОЛЕКУЛАМИ В НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ИСКУССТВЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ

*А. В. Толмачёва **

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

Впервые представлены экспериментальные данные о частоте ионно-молекулярных соударений на высотах E -слоя ионосферы, полученные методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. Измерения проводились в разные периоды времени с 1990 по 2012 год. Приведены временные и высотные зависимости частоты соударений. Проанализирована зависимость частоты соударений от солнечной и геомагнитной активности.

ВВЕДЕНИЕ

Соударения электронов и ионов с атомами и молекулами играют важную роль в физике ионосферы и атмосферы. В частности, они определяют силу трения и должны учитываться в уравнениях движения среды, когда увеличивается её вязкость. Частота ионно-молекулярных соударений влияет на процессы переноса энергии и импульса [1–4]. При рассмотрении распространения внутренних гравитационных волн выше 100 км необходимо учитывать их диссипацию вследствие увеличения вязкости среды [4–7], что имеет непосредственное отношение к соударениям. Частота столкновений ионов с нейтральными молекулами ν_{in} должна учитываться и при анализе низкочастотных процессов, связанных с проводимостью плазмы (см., например, работу [8]). Однако экспериментальных данных о величине ν_{in} не так много.

Между тем в верхней атмосфере могут наблюдаться значительные вариации частоты ионно-молекулярных соударений. Они чаще всего связаны с изменениями плотности нейтральной атмосферы, вызванными прохождением внутренних гравитационных и приливных волн. Вариации от дня к дню могут быть обусловлены распространением планетарных волн. На высотах верхней мезосферы-нижней термосферы вариации плотности нейтральной атмосферы по лидарным данным могут превышать 20 %, а вариации температуры — достигать 70 К [9, 10]. Наблюдения свидетельствуют, что при распространении гравитационных волн частота соударений может измениться в 1,5–2 раза за полтора часа [9, 11]. Вариации частоты соударений могут быть также следствием изменения состава как ионной компоненты, так и нейтральных атомов и молекул. В частности, в E -области ионосферы к изменению частоты соударений ионов с молекулами может привести проникновение металлических метеорных частиц и ионов, способствующих формированию как спорадических слоёв электронной концентрации, так и слоёв с повышенным содержанием атомов Na, K, Fe и др. [12–15].

В данной работе представлены результаты определения частоты соударений ионов с молекулами, полученные методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях плазмы на высотах E -области ионосферы.

* tolm41_arv@nirfi.sci-nnov.ru

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ СОУДАРЕНИЙ ИОНОВ С НЕЙТРАЛЬНЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ИСКУССТВЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Как известно, частота соударений ионов с молекулами зависит от температуры ионов T_i , при этом $\nu_{in} \propto \sqrt{T_i}$ [16, 17]. Однако в нижней части E -слоя частота ионно-молекулярных соударений определяется дипольным взаимодействием ионов и молекул, и при низких температурах (меньше 300 K) частота ν_{in} не зависит от температуры ионов [16, 18]. Для смеси характерных для этой области ионов NO^+ и O_2^+ , молекул N_2 и O_2 и атомов O частота соударений ионов с нейтральными частицами равна

$$\nu_{in}[\text{с}^{-1}] = 4,305 \cdot 10^{-10} N_n[\text{см}^{-3}] [p(\text{N}_2) + 0,98p(\text{O}_2) + 0,57p(\text{O})], \quad (1)$$

где N_n — концентрация нейтральных частиц воздуха, $p(\text{N}_2)$, $p(\text{O}_2)$ и $p(\text{O})$ — относительное объёмное содержание компонент N_2 , O_2 и O соответственно. Следуя работе [9], введём коэффициент пропорциональности β и получим простое выражение

$$\nu_{in} = \beta \rho / M, \quad (2)$$

или $\nu_{in}[\text{с}^{-1}] = 3,8 \cdot 10^{-10} N_n[\text{см}^{-3}]$. Здесь ρ — плотность воздуха, M — средняя масса молекул. Однако в случае изменения состава атмосферы, например при появлении метеорного вещества в областях формирования спорадических слоёв, необходимо ввести соответствующие дополнительные слагаемые в формулу (1). В таких условиях величина ν_{in} не определялась.

Способ измерения параметров нейтральной атмосферы путём резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) был впервые предложен в 1993 году [19]. Он принадлежит к группе методов диагностики ионосферной плазмы и атмосферы, которые были разработаны при изучении воздействия на ионосферу мощным высокочастотным радиоизлучением [20, 21]. При таком воздействии в результате интерференции падающей на ионосферу и отражённой от неё радиоволн возникает стоячая волна. В её поле формируется периодическая структура возмущений электронной концентрации. Искусственные периодические неоднородности образуются в высотном интервале от примерно 60 км до точки отражения мощной радиоволны от ионосферы. При зондировании искусственных периодических неоднородностей короткими радиоимпульсами происходит резонансное (брэгговское) рассеяние в области высот, где равны длины возмущающей и пробной волн. В экспериментах регистрируются амплитуды и фазы сигналов, обратно рассеянных искусственными периодическими неоднородностями. Для определения времени τ релаксации неоднородностей измеряется амплитуда A сигнала, рассеянного на каждой из высот после выключения мощного радиоизлучения. Временная зависимость амплитуды сигнала аппроксимируется функцией $A(t) = A_0 \exp(-t/\tau)$, где $A_0 = A(0)$.

В высотном интервале 90÷130 км искусственные периодические неоднородности возникают благодаря диффузионному перераспределению нагретой плазмы, а их релаксация происходит в результате амбиполярной диффузии. Время релаксации искусственных периодических неоднородностей на этих высотах после выключения мощного радиоизлучения зависит от волнового числа стоячей волны K на данной высоте и коэффициента амбиполярной диффузии D_α : $\tau = (K^2 D_\alpha)^{-1}$, где $K = 2\pi/\Lambda$, Λ — длина стоячей волны в среде¹. Длина Λ соответствует вертикальному масштабу искусственных периодических неоднородностей. Коэффициент амбиполяр-

¹ Для определения длины волны необходимо знать показатель преломления среды, зависящий от концентрации плазмы.

ной диффузии определяется температурами электронов (T_e) и ионов (T_i), а также частотой соударений ионов с нейтральными частицами ν_{in} :

$$D_\alpha = \frac{\kappa(T_e + T_i)}{M_i \nu_{in}}, \quad (3)$$

где κ — постоянная Больцмана, M_i — средняя масса ионов. Для определения атмосферных параметров приняты два предположения. Во-первых, считается, что температуры электронов и ионов равны: $T_e = T_i = T$. Это справедливо в высотном интервале ниже 110÷115 км в умеренных широтах. Значит,

$$D_\alpha = \frac{2\kappa T}{M_i \nu_{in}}.$$

Во-вторых, атмосфера считается изотермической в пределах высотных интервалов около 3÷5 км. Такой подход связан с большой изменчивостью атмосферных параметров выше 90÷100 км вследствие характерных естественных волновых процессов. Моделирование показало, что на высотах 100÷120 км термодинамическое равновесие не успевает достигаться в большем высотном интервале. Это обстоятельство и привело к вышеописанной методике определения атмосферных параметров.

При этих предположениях атмосферные параметры могут быть определены из высотной зависимости времени релаксации $\tau(z)$ рассеянного сигнала, где z — высота. Температура T и высотная зависимость плотности воздуха $\rho(z)$ выражаются следующим образом [19, 22]:

$$T = MgH/\kappa, \quad \rho(z) = \frac{8K^2\kappa T\tau(z)}{\beta} \frac{M}{M_i}, \quad (4)$$

а частота ν_{in} определяется формулой (2). Здесь g — ускорение свободного падения, H — высота однородной атмосферы (величина H определяется из высотной зависимости $\tau(z)$).

Для уменьшения статистической погрешности определения времён релаксации искусственных периодических неоднородностей применялось усреднение по 15÷20 реализациям. Относительная ошибка определения температуры T составляла около 5 %, плотности ρ — около 10÷15 %, а частоты соударений ν_{in} — около 20÷25 %.

2. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты по определению атмосферных параметров проводились в НИРФИ начиная с 1990 года. Эксперименты 1990–1992 годов проводились на базе нагревного стенда «Ястреб» в лаборатории НИРФИ «Зимёнки» (координаты 56,1° с. ш., 44,3° в. д.) [20]. В 1999 году эксперименты были возобновлены, а воздействие на ионосферу осуществлялось мощными передатчиками установки «Сура», расположенной вблизи Васильсурска (координаты 56,1° с. ш., 46,1° в. д.). С небольшими перерывами эксперименты проводились до 2007 года и были продолжены в 2010–2012 годах.

2.1. Эксперименты 1990–1992 годов

Продолжительный цикл измерений, давший большой объём экспериментальных данных, был осуществлён в период с сентября 1990 года по март 1992 года. Измерения проводились ежемесячно в течение нескольких дней в дневные часы, за исключением летнего сезона.

Искусственные периодические неоднородности возникали благодаря излучению волн необыкновенной поляризации на частоте 5,828 МГц или 5,545 МГц радиопередатчиком с эквивалентной

мощностью 20 МВт. Нагревный стенд работал циклами с периодом $10 \div 15$ с: мощный сигнал излучался в течение $4 \div 5$ с, а во время паузы в его работе диагностировались искусственные периодические неоднородности. Для этого применялась установка частичных отражений, расположенная вблизи нагревного стенда. Мощность передатчика этой установки в импульсе составляла около 500 кВт, коэффициент усиления приёмно-передающей антенны был равен примерно 200, что соответствует 23 дБ. Кроме амплитуд и фаз обратно рассеянных сигналов, измерялись высотные профили электронной концентрации $N(z)$ методом, описанным в работе [20]. Для регистрации фаз и амплитуд рассеянных сигналов применялась приёмно-регистрирующая аппаратура, позволявшая вести запись данных одновременно с шести высот с шагом по высоте от 3 до 5 км. Длительность зондирующего импульса составляла 50 мкс. Для определения высотной зависимости $\tau(z)$ измерялась амплитуда сигнала, приходившего с разных высот.

Летом 1996 года приёмно-регистрирующая аппаратура была модернизирована с целью внедрения цифровой регистрации данных, позволившей улучшить высотное разрешение и использовать компьютерную обработку принимаемых сигналов. Наблюдения были перенесены в загородную лабораторию НИРФИ «Васильсурск», где находится мощный нагревный стенд «Сура». Эффективная мощность излучения составляла $150 \div 280$ МВт. Рассеянные сигналы принимались антенной, имеющей 12 синфазных диполей для каждой линейной поляризации. Усиление сигналов происходило в приёмнике с полосой пропускания 50 кГц. Сигналы, рассеянные на искусственных периодических неоднородностях, регистрировались с высотным шагом 1,2 км в виде двух квадратурных компонент, кодировались десятиразрядным аналого-цифровым преобразователем и подвергались компьютерной обработке. Наблюдения искусственных периодических неоднородностей с помощью модернизированной аппаратуры были выполнены в 1999, 2000, 2002, 2004 и 2005 годах. В этот период электронная концентрация непосредственно не измерялась, а для её определения использовались различные ионосферные модели. Измерения в 1999–2002 годах проводились в августе, а в 2004 и 2005 годах — в апреле.

2.2. Эксперименты 2006–2007 годов

В 2005–2006 годах был предложен новый метод определения электронной концентрации на высотах E -области ионосферы [23–25], позволяющий найти высотный профиль электронной концентрации в том высотном интервале, в котором определяются атмосферные параметры. Применение этого метода открыло широкие возможности измерения атмосферных параметров. Во-первых, он позволил увеличить точность их определения. Во-вторых, применение двух радиоволн с разными частотами для создания искусственных периодических неоднородностей в ряде случаев позволило увеличить высотный интервал регистрации последних и тем самым достигнуть прогресса в изучении динамических явлений на высотах интервале между 90 и 120 км.

Весной и осенью 2006–2007 годов было проведено несколько циклов наблюдений искусственных периодических неоднородностей.

2.3. Эксперименты 2010–2012 годов

В период с 2010 по 2012 годы электронная концентрация описанным выше методом не измерялась, поэтому использовались профили $N(z)$, полученные по данным вертикального зондирования ионосферы. Когда это было невозможно, использовались модельные профили $N(z)$. Возникновение искусственных периодических неоднородностей было обусловлено воздействием на ионосферу радиоволн с частотой 4,7 МГц. На этой же частоте проводились измерения амплитуд и фаз обратно рассеянных сигналов.

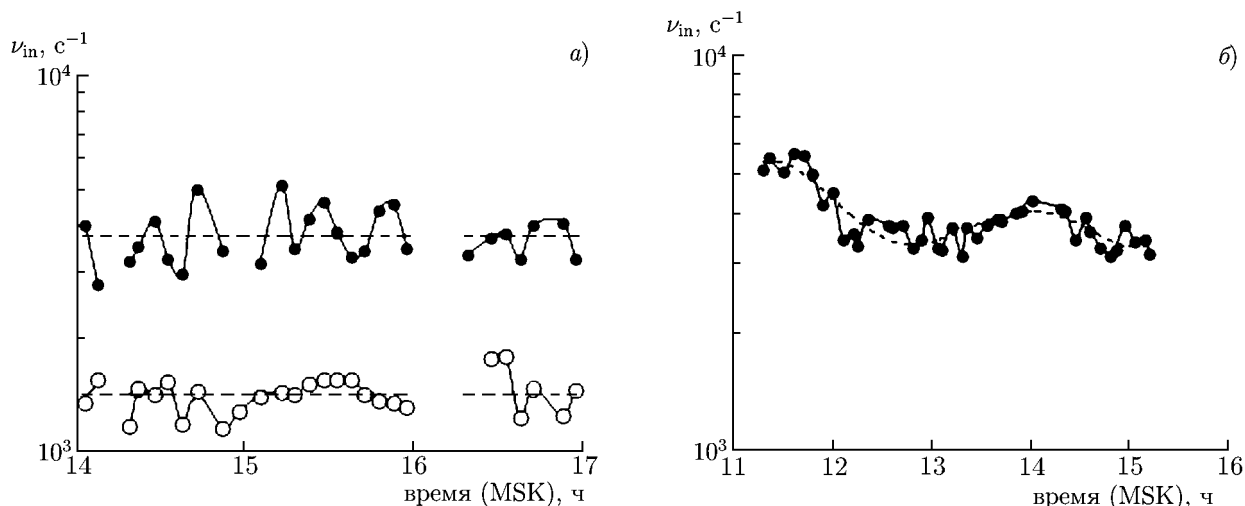


Рис. 1. Временная зависимость частоты ионно-молекулярных соударений по измерениям 12.08.1999 (а) и 01.10.1990 (б)

Данные об атмосферных параметрах (в частности, о частоте соударений ионов с молекулами) были получены для 38 дней.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Временные вариации частоты соударений чаще всего связаны с распространением атмосферных волн. На рис. 1 показаны временные примеры таких вариаций. На рис. 1а показаны изменения частоты ν_{in} на высотах 100 и 105 км в течение трёх часов 12.08.1999 начиная с 14:00 MSK. Чёрные кружки соответствуют высоте $z = 100$ км, белые — $z = 105$ км. Пунктиром показаны средние значения частоты ν_{in} за период наблюдений (3760 с^{-1} на высоте 100 км, 1430 с^{-1} на высоте 105 км). Разброс частот на высоте 100 км составлял более 1000 с^{-1} , а на высоте 105 км — от 250 до 700 с^{-1} , превышая ошибки измерений. Следует отметить, что 12.08.1999 наблюдалась повышенная волновая активность и спорадические ионосферные слои [26]. На рис. 1б приведена временная зависимость частоты ν_{in} по измерениям 01.10.1990 на высоте 102 км. В оба периода наблюдений (12.08.1999 и 01.10.1990) отмечались временные колебания частоты ν_{in} с периодом $20 \div 25$ мин, характерным для распространяющихся на этих высотах внутренних гравитационных волн. Кроме них, в данных для 01.10.1990 заметна долгопериодная компонента с периодом около 2 ч. (На рис. 1б пунктиром показан полиномиальный тренд за этот период.)

В работе [27] даются средние частоты соударений, полученные в г. Тромсё (Норвегия) на установке EISCAT (координаты $69,6^\circ$ с. ш., $19,2^\circ$ в. д.) на высотах от 92 до 103,5 км. По данным статьи [27], зимой и в периоды равноденствий частота соударений ν_{in} на высоте 100 км составляла примерно 5000 с^{-1} , а летом — примерно 2800 с^{-1} . По нашим сведениям, на высотах около 100 км в летний сезон были близкие значения частоты соударений, тогда как в периоды равноденствий в умеренных широтах мы получали в среднем меньшие величины. Возможно, что эти различия величин ν_{in} связаны с атмосферной волновой активностью, а не с сезонной или широтной зависимостью.

Характерные высотные зависимости $\nu_{in}(z)$ представлены на рис. 2. Пунктиром показаны частоты соударений, полученные из модели [28], а кружками — измеренные величины. Рис. 2а представляет зависимость $\nu_{in}(z)$ для 16.06.2011, когда атмосферная волновая активность была незначительной. Видно, что измеренные и рассчитанные по атмосферной модели частоты близ-

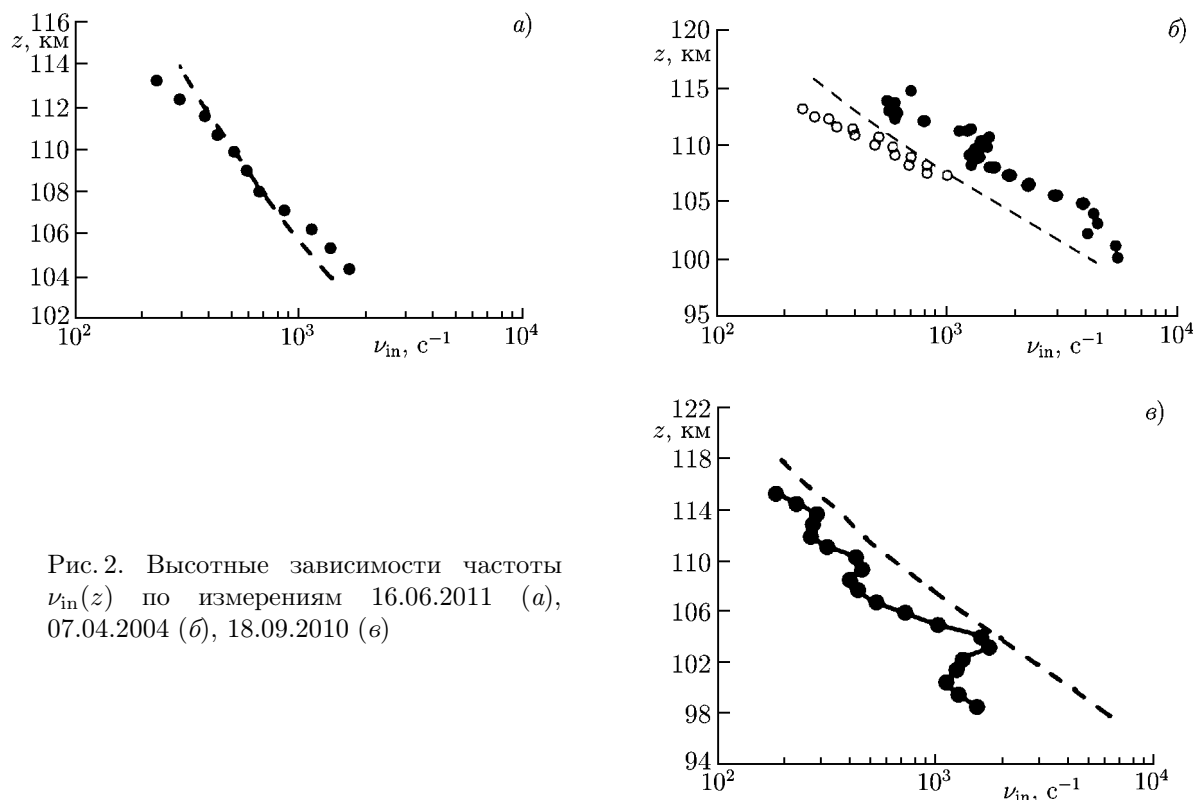


Рис. 2. Высотные зависимости частоты $\nu_{in}(z)$ по измерениям 16.06.2011 (а), 07.04.2004 (б), 18.09.2010 (в)

ки. Другая картина имеет место, когда наблюдается значительная волновая активность в данном высотном интервале.

На рис. 2б показаны зависимости $\nu_{in}(z)$ для 07.04.2004. Величины ν_{in} , полученные в период 13:20–14:05 MSK, обозначены чёрными кружками. В этот период наблюдалась внутренняя гравитационная волна. Белыми кружками обозначены значения ν_{in} , полученные спустя полчаса после прохождения волны (в период 14:25–14:35 MSK). Как видно из рис. 2б, частота ν_{in} (на высоте 110 км) сильно уменьшилась (почти на 700 c^{-1}) и стала ближе к модельной зависимости (пунктир) после прохождения волны.

Рис. 2в показывает зависимость $\nu_{in}(z)$ в условиях нарастания плазменной неустойчивости, наблюдавшейся 18.09.2010 на высоте 103 км (подробнее см. работу [7]). В этом случае, напротив, измеренные частоты соударений были меньше соответствующих величин, рассчитанных из атмосферной модели. Значительные вариации частоты соударений, а также других атмосферных параметров наблюдались и другими экспериментаторами [11, 26]. Эти вариации могут происходить, как предполагают авторы этих работ, под влиянием гравитационных волн с большой амплитудой и периодом [29], вызывающих адвекцию, т. е. горизонтальный перенос воздуха, и/или значительный вертикальный перенос [9]. Приведённые данные позволяют утверждать, что определённые методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях и методом некогерентного рассеяния частоты соударений ионов с молекулами на высотах E -слоя близки, а имеющиеся расхождения связаны с постоянной атмосферной волновой активностью и, возможно, с развитием неустойчивостей.

В работе [27] приведены данные об атмосферных параметрах, в том числе и о частоте соударений, полученных в течение 11-летнего цикла в зависимости от солнечной активности (т. е. потока излучения с длиной волны 10,7 см) и геомагнитной активности (геомагнитного индекса A_p). Автор статьи [27] указывает на отчётливую зависимость температуры от солнечной актив-

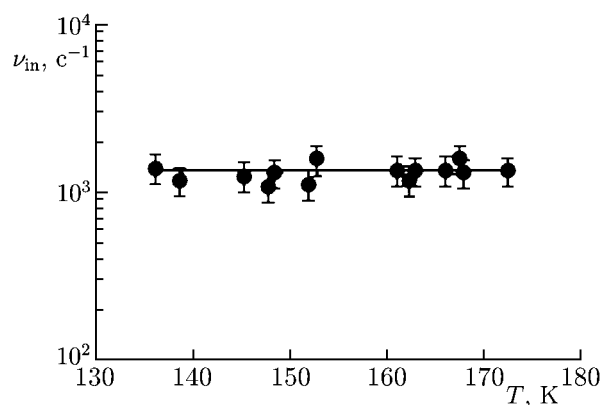


Рис. 3. Зависимость частоты соударений от температуры на высоте 103,7 км по измерениям 06.12.1991

сезоны. Скорее всего, отмеченное слабое проявление этих зависимостей обусловлено почти постоянно присутствующими атмосферными волнами и движениями.

На рис. 3 показана зависимость $\nu_{in}(T)$ на высоте 103,7 км, найденная 06.12.1991 в период времени 09–40÷11:15 MSK. Вертикальными отрезками обозначены пределы ошибок измерений, а сплошная горизонтальная линия соответствует средней за указанный временной интервал частоте ионно-молекулярных соударений, которая равна 1330 с^{-1} . Из рисунка видно, что вариации частоты соударений в течение этого периода не превышали ошибок измерений, т. е. частота ν_{in} не зависит от температуры. Анализ данных, полученных в другие дни, подтверждает эту точку зрения. Обобщая, можно сказать, что частота ν_{in} не зависит от температуры как минимум ниже 250 К. Поэтому использование соотношения (2) для определения частоты ν_{in} можно считать корректным, и оно не противоречит принятому предположению о дипольном взаимодействии при соударениях.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты измерений частоты ионно-молекулярных соударений методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях соответствуют современным экспериментальным данным. Относительные ошибки определения частоты соударений ионов с молекулами составляли 20÷25 %. Временные изменения частоты $\nu_{in}(t)$ отражают волновые процессы, происходящие в области верхней мезосферы и нижней термосферы, т. е. распространение внутренних гравитационных и приливных волн. Высотные зависимости $\nu_{in}(z)$ близки к модельным профилям, если уровень атмосферной волновой возмущённости невелик. Но при наличии внутренних гравитационных волн или развитии плазменных不устойчивостей частота соударений может отклоняться от модельных значений на $300\div500\text{ с}^{-1}$. Такие отклонения могут быть связаны с процессами горизонтального или вертикального переноса воздуха. Ясной зависимости частоты ν_{in} от солнечной и геомагнитной активности на высотах E -области получить не удалось. Вероятнее всего, постоянная изменчивость атмосферных параметров, вызванная волновыми явлениями, скрывает её. Анализ зависимости $\nu_{in}(T)$ показал, что величина ν_{in} на заданной высоте в течение небольшого времени остаётся постоянной в интервале температур ниже 250 К. Таким образом, подтверждено, что частота соударений определяется дипольным взаимодействием ионов и молекул, и для её определения применимо выражение (2).

ности, но для частоты соударений температурная зависимость менее заметна, и соответствующие коэффициенты корреляции невелики.

Мы также исследовали связь атмосферных параметров с солнечной и геомагнитной активностью. В качестве индексов были использованы число солнечных пятен для каждого дня (R) и суммарный суточный планетарный индекс геомагнитной активности (K_p), т. к. измерения проводились в умеренных широтах. Мы не обнаружили значимой зависимости частоты соударений ни от магнитной активности (что неудивительно для умеренных широт), ни от солнечной активности. В работе [27] показано, что такие зависимости неярко выражены и отличаются в разные

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 13-02-97067-р_поволжье_а, 13-05-00511, 14-05-10019 и 13-02-12074).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.
2. Шакина Н. П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 309 с.
3. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. М.: Наука, 1974. 256 с.
4. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
5. Hocking W. K. // Adv. Space Res. 1990. V. 7. P. 171.
6. Григорьев Г. И., Савина О. Н. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 1. С. 41.
7. Толмачёва А. В., Григорьев Г. И., Бахметьева Н. В. // Химическая физика. 2013. Т. 32, № 9. С. 89.
8. Ермакова Е. Н., Котик Д. С., Рябов А. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 10-11. С. 671.
9. Fla T., Kirkwood S., Schlegel K. // Radio Sci. 1985. V. 20, No. 4. P. 785.
10. Pancheva D., Mukhtarov P., Andronov B. // Ann. Geophys. 2009. V. 27, No. 2. P. 687.
11. Tepley C. A., Mathews J. D. // J. Geophys. Res. A. 1978. V. 83, No. 7. P. 3299.
12. Delgado R., Friedman J. S., Fentzke J. T., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 74. P. 11.
13. Hervig M. E., Deaver L. E., Bardeen C. G., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. V. 84-85. P. 1.
14. Dunker T., Hoppe U.-P., Stober G., Rapp M. // Ann. Geophys. 2013. V. 31. P. 61.
15. Bakhmet'eva N. V., Kagan L. M., Belikovich V. V., Ponyatov A. A. // Proc. 10th Annual RF Ionospheric Intern. Workshop, Santa Fe, USA, 2004. V. 2. P. 1038.
16. Далгарно А. // Успехи физич. наук. 1963. Т. 79, Вып. 1. С. 115.
17. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 683 с.
18. Banks P. M., and Kockarts G. Aeronomy. Part A. New York: Academic Press, 1973.
19. Бенедиктов Е. А., Беликович В. В., Гребнев Ю. Н., Толмачёва А. В. // Геомагнетизм и аэронамия. 1993. Т. 33, № 5. С. 170.
20. Бенедиктов Е. А., Беликович В. В., Толмачёва А. В., Бахметьева Н. В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1999. 156 с.
21. Belikovich V. V., Benediktov E. A., Tolmacheva A. V., Bakhmet'eva N. V. Ionospheric research by means of artificial periodic irregularities. Copernicus GmbH, 2002. 160 p.
22. Tolmacheva A. V., Belikovich V. V. // Intern. J. Geomagnetism and Aeronomy. 2004. V. 5, No. 1. Art. no. GI1008.
23. Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Калинина Е. Е., Толмачёва А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 9. С. 744.
24. Беликович В. В., Бахметьева Н. В., Бубукина В. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 6. С. 477.
25. Толмачёва А. В., Беликович В. В., Калинина Е. Е. // Геомагнетизм и аэронамия. 2009. Т. 49, № 2. С. 254.
26. Бахметьева Н. В., Беликович В. В., Игнатьев Ю. А., Понятов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 2. С. 26.
27. Kirkwood S. // J. Atmos. Terr. Phys. 1986. V. 48. P. 817.

28. MSIS-E-90 atmosphere model: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html.
29. Krassovsky V.I., Shagaev M.V. // Planet. Space Sci. 1977. V. 25. P. 200.

Поступила в редакцию 4 июня 2014 г.; принята в печать 14 октября 2014 г.

**RESULTS OF THE ION–NEUTRAL COLLISION FREQUENCY MEASUREMENTS
IN THE LOWER THERMOSPHERE BY THE METHOD OF RESONANCE
SCATTERING OF THE RADIO WAVES BY ARTIFICIAL PERIODIC
IRREGULARITIES**

A. V. Tolmacheva

We present for the first time the experimental data on the frequency of ion–neutral collisions at the altitudes of the ionospheric E-layer, which were obtained by the method of resonance scattering of the radio waves by artificial periodic irregularities of the ionospheric plasma (API techniques). The measurements were carried out in different time periods from 1990 to 2012. Time and altitude dependences of the collision frequency are given. The dependence of the collision frequency on the solar and geomagnetic activity has been analyzed.