

УДК 551.508

ДИНАМИКА ЛИДАРНЫХ ОТРАЖЕНИЙ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ КАМЧАТКИ И ЕЕ СВЯЗЬ С ЯВЛЕНИЯМИ В ИОНОСФЕРЕ

© 2012 г. В. В. Бычков, Б. М. Шевцов

ФГБУ науки Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка,
(Елизовский район, Камчатский край)

e-mail: vasily@ikir.ru

Поступила в редакцию 01.03.2011 г.

После доработки 09.10.2011 г.

Проанализированы результаты релеевского лидарного зондирования верхней атмосферы над Камчаткой в сопоставлении с данными ионозонда. Обнаружена корреляция сигналов обратного рассеяния света на длине волны 532 нм с параметрами, определяющими содержание плазмы в ночном слое $F2$ ионосферы. На основании проведенного анализа лидарных данных и геофизической обстановки обсуждается гипотеза о возможной роли ридберговских атомов в формировании лидарных отражений на ионосферных высотах.

1. ВВЕДЕНИЕ

Считается общепринятым, что при релеевском лидарном зондировании атмосферы лидарные сигналы от области высот, превышающих 100 км отсутствуют. Нередко средний сигнал с этих высот используется для определения фонового сигнала. Между тем, в наблюдениях, выполненных на Камчатке в 2008–2009 гг., обнаружено, что в некоторые дни разница среднего сигнала от области высот 200–300 км, и независимо измеренного фонового сигнала коррелирует с содержанием плазмы в области максимума ночного слоя $F2$ ионосферы. В работе обсуждается возможный физический механизм, объясняющий эту корреляцию — формирование лидарных отражений с ионосферных высот в результате рассеяния на ридберговских атомах, возникающих в результате высыпаний электронов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Корреляция лидарных сигналов с состоянием ионосферы обнаружена при экспериментальном исследовании явления последствия фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) и вызванного им наклона суммарных лидарных сигналов к оси высот, сохраняющегося выше 100 км. Частота использованного лазера Brilliant B равнялась 10 Пц, энергия импульса — 0.4 Дж, расстояние между осями приемника и излучателя — 510 см. В приемном телескопе использована диафрагма 1.5 мм, что соответствует углу зрения приемника 7.5×10^{-4} рад. Сигнал накапливался ~8 ч и в итоге содержит 268400 единичных эхо-сигналов. Для исключения засветок ФЭУ от сигналов ближней зоны использовалось электронное записание ФЭУ им-

пульсом длительностью 140 мкс. Сигнал регистрировался в течение 4 мс после посылки каждого светового импульса лазера, с шагом 10 мкс, что соответствует области высот от 21 до 600 км с шагом по высоте 1.5 км. Значение фонового сигнала получалось усреднением 400 значений фона, измеренного в промежутке времени с 20-й по 24-ю миллисекунды после посылки каждого лазерного импульса.

Фоновый сигнал 28 марта 2008 г. составлял ~60–70 фотонов/с в течение всех 8-ми часов наблюдений, из них ~20 фотонов/с приходится на темновой шум ФЭУ. Такие значения фона наблюдаются обычно в безлунные ночи. Проверка по астрономическому календарю показала, что хотя фаза Луны в этот день равнялась 0.66, заход ее произошел в 07:25 UT, в то время как лидарные наблюдения начались в 9:00 UT. Отношение сигнала к фону сохраняло значения, превышающие единицу, вплоть до высоты 600 км. Среднее значение отношения сигнала к фону равнялось 1.5 по интервалу 150–200 км; 1.3 по интервалу 200–300 км и 1.2 по интервалу 300–400 км.

На рисунке 1а приведен ход $foF2$, критической частоты слоя $F2$ в этот день, построенный по 15-минутным значениям, измеренным автоматической ионосферной станцией (АИС) Камчатки. На графике $foF2$ с 13:00 и до 14:30 UT наблюдается небольшое, но достаточно резкое возрастание $foF2$. Одновременно отмечается уменьшение $h'F2$, действующей высоты слоя $F2$, на величину более 40 км к 14:30 UT (рис. 2а). Изменения в ходе высоты и частоты слоя $F2$ синхронны и могут быть связаны с усилением корпускулярных высыпаний ионизирующих частиц над точкой наблюдения. Наличие ночных спорадических слоев Es кор-

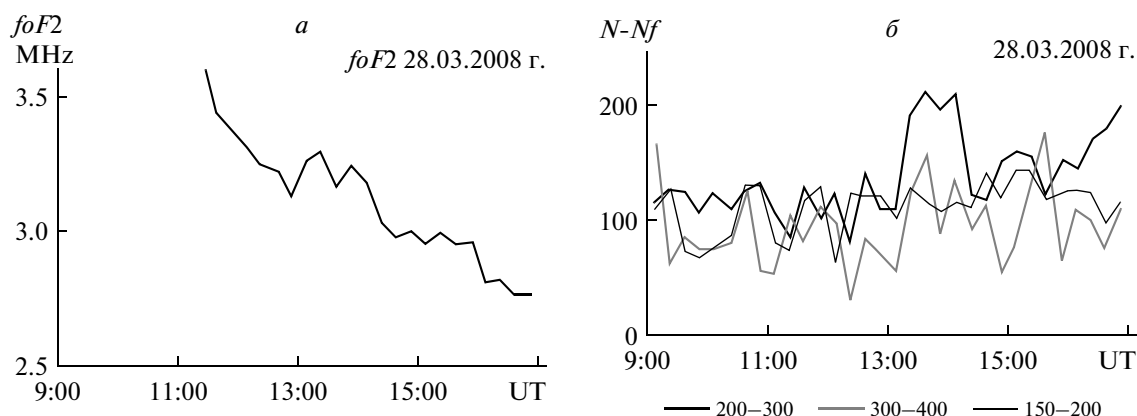


Рис. 1. Ход критической частоты слоя $F2$ 28.03.2008 г. (а) и суммарный лидарный сигнал от областей высот 200–300, 300–400 и 150–200 км (б).

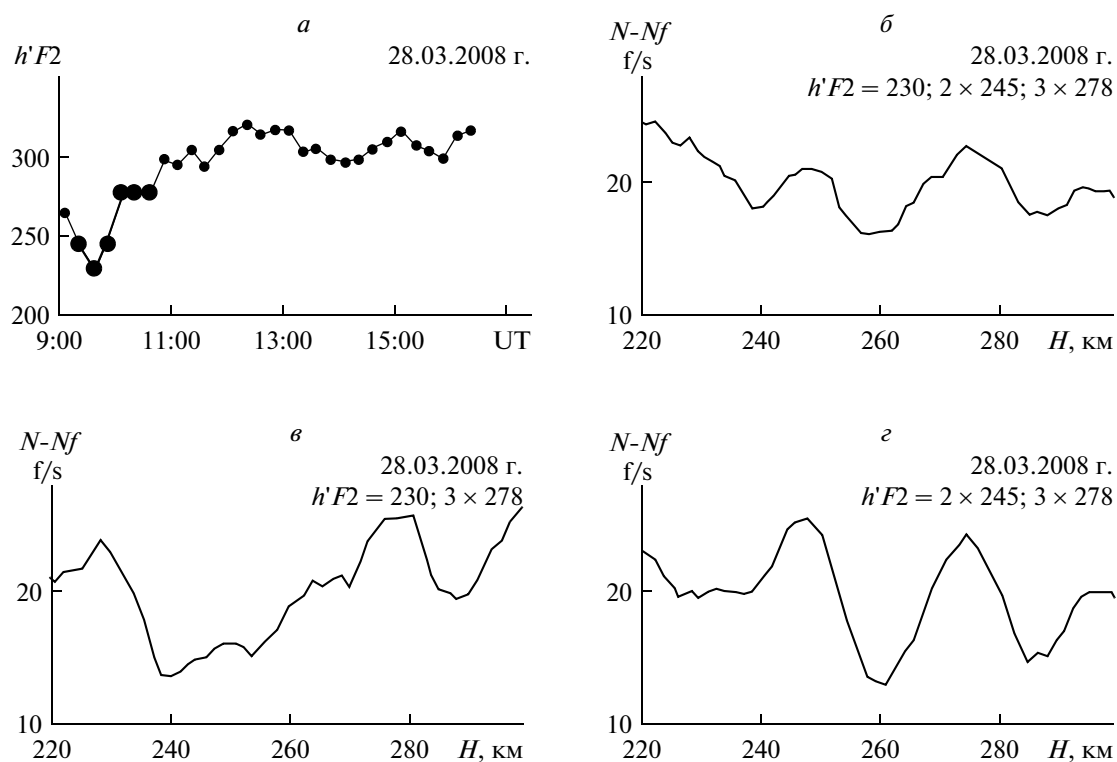


Рис. 2. Лидарный сигнал, суммированный по критерию значения $h'F2$ во время его накопления.

пускулярного типа в этот день по данным АИС Камчатки подтверждает это предположение.

На рисунке 1б приведен лидарный “сигнал минус фон” от областей 200–300, 300–400 и 150–200 км, полученный суммированием соответствующих значений в 1.5-километровых слоях. Не наблюдается корреляции между значениями кривой $foF2$ и лидарным сигналом от области 150–200 км. На сигнале от области 200–300 км наблюдается всплеск, совпадающий во времени со всплеском

$foF2$. Незначительный сдвиг во времени между всплесками на двух кривых объясняется тем, что лидарные данные накоплены в течение 15 мин, а сеанс зондирования ионосферы продолжался 45 с. С учетом этого обстоятельства можно констатировать, что совпадает не только время появления особенностей в ходе сигналов, но их морфология; всплеск в лидарных и ионосферных данных имеет двугорбую структуру. Значения графика “сигнал минус фон” от области 300–400 км сохраняют

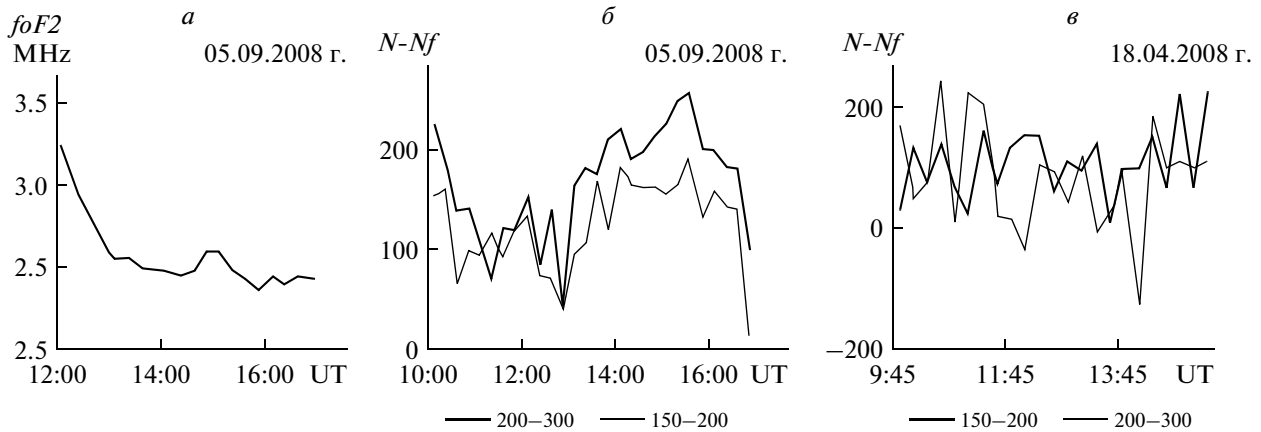


Рис. 3. Ход критической частоты слоя $F2$ (а) и лидарных сигналов 05.09.2008 г. (б) и 18.04.2008 г. (в).

корреляцию с ходом $foF2$ ионосферы, но уменьшается интенсивность сигнала, и усиливаются его флуктуации.

Другого рода корреляция суммарных лидарных сигналов с положением максимума слоя $F2$ в ранние ночные часы была обнаружена в этот же день с 9:00 до 10:30 UT. На рисунке 2а изображен ход $h'F2$ во время проведения лидарных наблюдений. На рисунках 2б–г представлены лидарные сигналы, усредненные по 15-минутным выборкам из интервала с 9:00 до 10:30 UT. Выборки сгруппированы по признаку значений $h'F2$, наблюдавшейся в момент накопления лидарных сигналов. Соответствовавшее по времени значение $h'F2$ обозначено на надписи в верхней части рисунков 2б–г. Для обеспечения корректности сравнения сигналы нормированы так, чтобы их размерность была фотон/с. Лидарные сигналы сглажены по высоте методом скользящего среднего.

Приведенные рисунки демонстрируют корреляцию лидарного сигнала с $h'F2$. Локальные максимумы в суммарном сигнале соответствуют положению $h'F2$, зафиксированному АИС в моменты накопления данных. Исключение из выборки 15-минутных лидарных сигналов уменьшает средний сигнал в области высот, в которых находился слой $F2$ в моменты накопления исключенных лидарных данных, и наоборот. Возможность накопить такой сигнал и обнаружить эту корреляцию, обусловлена быстрым изменением высоты слоя $F2$ в условиях сохранявшегося геомагнитного возмущения и задержкой его на высоте 278 км в течение ~45 мин, и в области 245 км – на ~30 мин.

Рисунки по другим комбинациям наборов данных не приводятся, но подтверждают корреляцию с положением максимума слоя $F2$. Исследование данных лидарных и ионосферных наблюдений за другие дни 2008 г. обнаружило еще ряд случаев корреляции лидарных сигналов с со-

держанием плазмы в максимуме ночного слоя $F2$ ионосферы. Сравнивались суммарные “сигнал минус фон” от областей 150–200 и 200–300 км. Максимальные значения разности “сигнал минус фон” во всех случаях относятся к области высот 200–300 км. Наблюдалась также корреляция лидарных сигналов от разных областей между собой, с коэффициентами корреляции 0.6–0.9 и доверительным интервалом порядка 0.2, чего не должно наблюдаться для сигналов с этих высот и что не наблюдается в обычные дни.

В качестве примера на рис. 3а приводятся данные хода $foF2$, а на рис. 3б – лидарные сигналы, усредненные по областям 150–200 и 200–300 км, полученные 5 сентября 2008 г. Нетипичное повышение $foF2$ в ночное время между 14:00 и 16:00 UT и возрастание значений лидарных сигналов совпадают во времени. Одновременно наблюдалось уменьшение $h'F2$ от 300 км в 14:00 UT до 250 км в 15:00 UT с последующим восстановлением до 300 км в 16:00 UT (рисунок не приводится). Коэффициент корреляции между сигналами от областей высот 150–200 км и 200–300 км равен 0.802. Наблюдения продолжались с 9:45 до 16:30 UT, и ряды данных содержат по 28 чисел, доверительный интервал равен (0.68–0.92) при уровне значимости 0.10 по критерию Стьюдента. Обоснование этих цифр приведено в Приложении. Этот пример показывает, что от области 150–200 км также могут наблюдаться повышенные значения лидарных сигналов, и качественно подтверждает корреляцию лидарных сигналов с ионосферных высот с величиной $foF2$.

Похожие данные, с коэффициентами корреляции между сигналами от разных областей высот порядка 0.8 и возрастанием $foF2$ во время роста лидарных сигналов, получены и на следующий день, 06.09.2008 г. Рисунки аналогичны рис. 3 и не приводятся. Коэффициент корреляции данных рис. 3в, в обычный день 18.04.2008, равен 0.02.

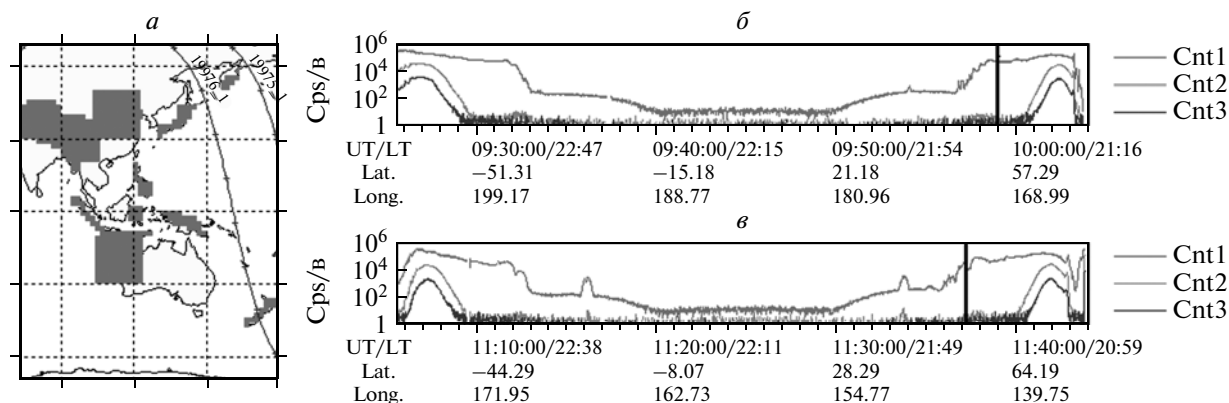


Рис. 4. Траектории орбит спутника Demeter 28.03.2008 г. (а); потоки электронов вдоль этих траекторий (б, в).

3. ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

Все корреляции обнаружены в условиях геомагнитных возмущений и сопровождались появлением спорадических слоев *Es* корпускулярного типа. Во всех случаях спутником Demeter [http://demeter.cnrs-orleans.fr/], пролетающим над Камчаткой непосредственно во время ночных лидарных наблюдений на высоте 660 км, регистрировалось повышение потоков релятивистских электронов.

Наблюдения 28.03.2008 г. проводились на третий день после максимума бури, имевшего место 26.03.2008 г. Среднее значение планетарного индекса *Kp* за 28.03.2008 г. равнялось 3.79 [http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/index.jsp]. По данным геомагнитной обсерватории ИКИР значения *K*-индексов 28.03.2008 г. равнялись 2, 2, 4, 4, 4, 3, 2, 2. Жирным шрифтом выделены *K*-индексы, зафиксированные непосредственно во время лидарных наблюдений. Значения *K*-индексов 05.09.2008 г. были в среднем характерными для магнитоспокойных условий. Но в предшествующий день, 04.09.2008 г. произошло геомагнитное возмущение со значениями местных *K*-индексов 4, 4, 4, 3, 4, 4, 2, —. Значение планетарного индекса *Kp* 04.09.2008 г. равнялось 5.7; 6; 3.7; 3.3; 3.7; 3.3; 2.3; 2.3. Согласно ионосферным данным за 05.09.2008 г. практически в течение всего времени проведения лидарных наблюдений на высоте 100 км наблюдались выраженные спорадические слои *Es* корпускулярного типа, значение *foEs* достигало 2.5–2.8 МГц.

Наличие высыпаний релятивистских электронов во время лидарных наблюдений подтверждается данными спутника Demeter. На рисунке 4а представлены орбиты спутника Demeter за 28.03.2008 г. восточнее и западнее Камчатки. На рисунках 4б, в представлено общее число электронов, зарегистрированных за секунду при движении вдоль этих орбит. Черными вертикальными

линиями отмечены моменты пересечения спутником широты 53° N, на которой расположены лидар и АИС Камчатки.

ИСЗ Demeter измерял потоки электронов на трех каналах: Cnt1 — (90.7–526.8 кэВ), Cnt2 — (526.8–971.8) кэВ, Cnt3 — (971.8–2342.4) кэВ. На витке, проходившем восточнее Камчатки, при пересечении широты 53° N в 9:59 UT зарегистрирован высокий уровень потоков электронов в интервале энергий 90.7–526.8 кэВ (рис. 4б, верхняя кривая). Рост потоков электронов в этот день начался на широтах, близких к 45° N. На широте 53° N он достиг значений 10⁴–10⁵ эл/с и не уменьшался до прохождения ближайшей к полюсу точки орбиты. В этом интервале энергий поток электронов на широте 53° N практически равнялся потоку электронов в авроральной зоне. В спектре высыпавшихся электронов, полученном при пересечении широты 53° N, максимальные потоки частиц зарегистрированы в интервале энергий 90–140 кэВ. Значения потоков электронов имели порядок 10³ эл/см²/с/стер.

В условиях сохранявшегося в это время геомагнитного возмущения, можно полагать, что близкие значения потоков электронов наблюдались в это время и над Камчаткой. Сохраняющиеся такие же высокие значения потоков на широте 53° N на следующем витке, через 1 ч 38 мин, в 11:37 UT, (рис. 4в) это подтверждают.

Наличие высыпаний мягких электронов 28.03.2008 г. над Камчаткой подтверждается одновременным появлением спорадических слоев *Es* корпускулярного типа, зарегистрированных Камчатской АИС. Ночью во время лидарных наблюдений спорадические слои *Es* корпускулярного типа с критической частотой 1.5–1.6 МГц регистрировались на высотах 135–150 км, начиная с 9:30 UT и до конца лидарных наблюдений. В ряде случаев из-за высокого для ночных условий поглощения судить о наличии *Es* можно было только по форме

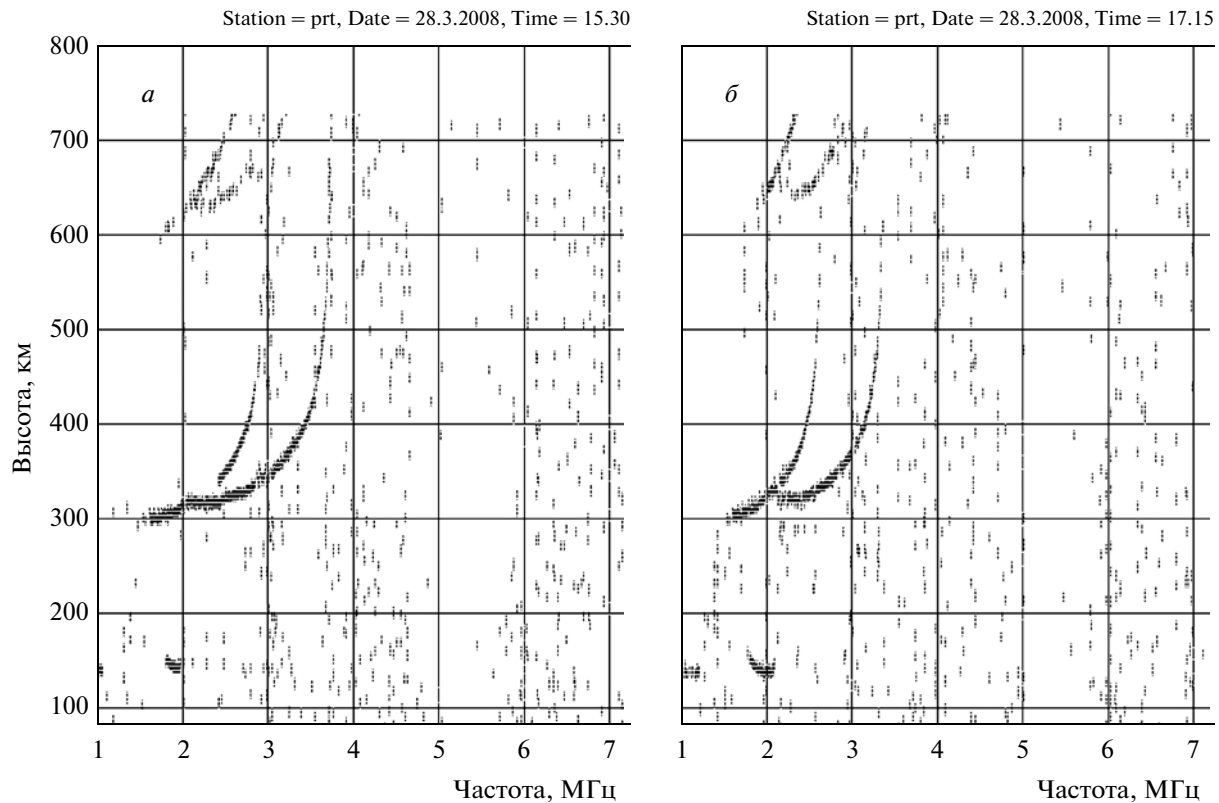


Рис. 5. Ионограммы с E_s корпускулярного типа, полученные Камчатской АИС 28.03.2008 г.

следа слоя $F2$. На рисунке 5 приведены ионограммы, полученные Камчатской АИС 28.03.2008 г. в конце лидарных наблюдений. По следу необыкновенной волны foE_s на этих ионограммах может быть определена как 1.55 МГц. Частота 1.55 МГц соответствует концентрации электронов $3 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, наличие высыпаний релятивистских и мягких электронов над Камчаткой во время лидарных наблюдений 28.03.2008 г. подтверждается спутниковыми и ионосферными данными. На высотах ~ 150 км скорость ионизации высыпающимися электронами по имеющимся ионосферным данным может быть оценена как $1.36 \times 10^2 \text{ 1/см}^3/\text{с}$. В интервале высот 200–300 км можно ожидать скорости ионизации порядка 20–90 $\text{1/см}^3/\text{с}$. Обоснование этих оценок приведено в Приложении.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В соответствии с лидарными данными за 28.03.2008 г. увеличение суммарного сигнала на ~ 100 фотонов в течение периода с 13:00 до 14:30 UT (рис. 1б) представляет собой накопленный сигнал в чистом виде. Это фотоны, подсчитанные за каждые 15 мин наблюдений (~ 9000 эхо-сигналов) в течение полутора часов. С учетом квантовой эффективности ФЭУ, равной $\sim 30\%$, фактическое

число пришедших фотонов превышает 100 в ~ 3 раза, и является значимой величиной для пуассоновской статистики. Отсутствие корреляции сигнала от области 100–150 км, и уменьшение сигнала после высоты 300 км, позволяет сделать предположение об образовании слоя рассеивателей с большими сечениями взаимодействия и максимумом содержания в области 200–300 км.

Обнаруженная корреляция лидарных сигналов с плотностью плазмы на ионосферных высотах, требует объяснения. Одной из возможных представляется гипотеза об участии высоковозбужденных, но не ионизованных, ридберговских атомов, в формировании лидарных сигналов с этих высот. В работе [Авакян и др., 1997] ридберговские атомы рассматривались, как возможный источник генерации собственного микроволнового и далекого инфракрасного излучения ионосферы. Ниже приводятся свойства ридберговских атомов, взятые из работ [Авакян и др., 1997; Делоне, 1998]. Радиус орбиты ридберговского атома $r \sim n^2$, геометрическое сечение $s \sim n^4$, время жизни $\tau \sim n^3 - n^5$, в зависимости от значений орбитального квантового числа, поляризуемость $\alpha \sim n^7$, разность энергий между двумя возбужденными уровнями $\Delta E \sim n^{-3}$. Здесь n – главное квантовое число возбужденного состояния. Из приведен-

ных оценок видно, что свойства ридберговских атомов, определяющие сечение взаимодействия атома с излучением, могут меняться на много порядков.

Сечение рассеяния света для одиночного атома определяется по формуле: $\sigma = 8|\alpha|^2\omega^4/(3\pi c^4)$, где α – поляризуемость, ω – частота падающего излучения, c – скорость света [Энциклопедия физики, 1994]. При $n = 10$ сечение рассеяния возрастает на 14 порядков, поскольку оно пропорционально квадрату поляризуемости. Среднее сечение молекулярного рассеяния в видимом диапазоне в пересчете на одну частицу равно $\sim 10^{-27}$ см²/стер. Из этих оценок следует, что при $n = 10$ сечение $\sigma \sim 10^{-13}$ см². В работе [Avakyan and Voronin, 2006] геометрическое сечение таких атомов оценено как $\sigma \sim 10^{-12}$ см² для $n = 10$, и $\sigma \sim 10^{-11}$ см² для $n = 20$. Характерный поперечный размер сечения рассеяния таких атомов и молекул становится сравнимым с длиной волны 532 нм, использовавшейся в наблюдениях.

В работе [Tarr et al., 1981] рассмотрено образование долгоживущих метастабильных состояний высоковозбужденных ридберговских атомов в эксперименте с электронным ударом. Детектирование атомов осуществлялось методом их ионизации в электрическом поле. Характерное время жизни возбужденных атомов в этом эксперименте имеет порядок ~ 100 мкс. В работе отмечено, что такие процессы, как предиссоциация и автоионизация становятся невозможными при больших значениях орбитального углового момента. В свою очередь, высокие значения орбитального углового момента не образуются при фотопоглощении из-за правил отбора, но очень хорошо могут возбуждаться электронным ударом при малой энергии частицы. Для электронов в диапазоне энергий от 15 до 60 эВ сечения ридберговского возбуждения превышают сечения всех других процессов ионизации и возбуждения для основных составляющих верхней атмосферы N₂, O₂, O [Banks, Kockarts, 1973].

В работе [Avakyan and Voronin, 2006] приводятся данные о времени жизни ридберговских атомов. Для высоты 100 км оно может быть оценено по формуле $\tau \sim n^4 \times 10^{-9}$ с. В работе [Avakyan, 2006] приводятся результаты расчетов увеличения времени между столкновениями ридберговских атомов с нейтралами с ростом высоты от 100 до 250 км. В связи с уменьшением плотности атмосферы, на высоте 250 км это время увеличивается на 4–5 порядков. В приведенных в этой работе примерах, для состояний со значением главного квантового числа n , равного 10 и 20, и сечений 10^{-12} см² и 10^{-13} см² на высоте 250 км это время изменяется от величин, меньших 0.01 с ($s = 10^{-12}$ см²) до ~ 0.5 с ($s = 10^{-13}$ см²). Поскольку столкновения с нейтра-

лами являются основным процессом, определяющим гибель возбужденных атомов, время жизни таких состояний на высотах 250 км должно иметь такой же порядок. В классическом учебнике атомной физики [Шпольский, 1984] отмечается, что время жизни метастабильных состояний может достигать значений 10^{-3} –1 с, приводятся примеры возбужденных состояний атома кислорода с временем жизни в 42 с, это состояние ¹D₂, ¹D – 100 с, и ¹S – 0.5 с.

В работе [Avakyan and Voronin, 2006] приводятся результаты расчета суммарной скорости возбуждения ридберговских состояний для атома кислорода и молекул азота и кислорода для ночной авроральной ионосферы. На высоте 105 км суммарная скорость образования возбужденных атомов составляет $\sim 10^4$ 1/см³/с. Для парциальных состояний эта скорость имеет порядок величины 10^2 1/см³/с. На высоте 250 км значения скоростей возбуждения конкретных ридберговских состояний составляют от 1 до 5 1/см³/с. Согласно этим оценкам содержание таких атомов, равное скорости образования, помноженной на время жизни, будет иметь максимум в области 250 км или выше.

Простые оценки показывают, каких скоростей образования достаточно, чтобы получить наблюдавшийся сигнал. Площадь приемного зеркала телескопа равна 0.28 м². В предположении изотропного рассеяния, отношение площади зеркала к общей поверхности рассеяния с высоты 250 км равно $\sim 5.7 \times 10^{-12}$. Расходимость лазерного луча с коллиматором ~ 0.06 мрад. На высоте 250 км диаметр пятна ~ 15 м. Засвеченный объем в слое от 200 до 300 км равен $\sim 5.6 \times 10^{12}$ см³. Если каждую секунду будет происходить один акт рассеяния в каждом кубическом сантиметре объема, то на зеркало будет попадать ~ 1 фотон/с. В наблюдениях 28.03.2008 г. зарегистрирована на порядок меньшая скорость поступления фотонов. С учетом квантовой эффективности ФЭУ скорости рассеяния 0.3 фотон/см³/с достаточно, чтобы объяснить наблюдавшийся сигнал.

Большие геометрические сечения ридберговских атомов (10^{-12} см² для $n = 10$) [Avakyan and Voronin, 2006], обеспечивают высокую вероятность взаимодействия их с излучением лазерного импульса ($\sim 3.5 \times 10^{14}$ фотонов/см²/с на высоте 250 км). При частоте лазера 10 Пц все образующиеся атомы с временем жизни большим, чем 0.1 с, с большой вероятностью будут взаимодействовать с излучением. Ионизация электронами в ионосфере происходит всегда, и всегда в конце процесса расходования энергии на отдельные акты ионизации в итоге все вновь образовавшиеся электроны становятся мало энергичными с большими сечениями возбуждения ридберговских состояний ато-

мов и молекул, в том числе и метастабильных состояний.

Проведенные оценки скорости ионизации 28.03.2008 г., равные 20–90 1/см³/с в области высот 200–300 км, дают основания предполагать, что эти электроны могут обеспечить образование 3-х атомов за 10 с с нужными размерами и временем жизни, достаточными для их взаимодействия с фотоном с длиной волны равной 532 нм. Взаимодействие таких атомов с лазерным излучением может вызывать его рассеяние, если энергия фотона на длине волны 532 нм, равная 2.4 эВ, недостаточна для ионизации возбужденного атома.

Необходимы более строгие оценки, включающие расчет функций ионизации и оценки скоростей возбуждения ридберговских состояний, ослабление интенсивности излучения в атмосфере, учет индикатрисы рассеяния. Необходимы также дополнительные исследования с целью определения конкретного механизма рассеяния. Это должны быть атомы или молекулы в состояниях, обеспечивающих достаточный размер и время жизни, чтобы получить наблюдаемый сигнал. Это не должны быть состояния со слишком большим значением главного квантового числа, разность между потенциалом ионизации и энергией возбужденного состояния должна превышать энергию фотона, равную 2.4 эВ на длине волны 532 нм. Обоим этим требованиям удовлетворяют возбужденные атомы и молекулы с главным квантовым числом близким к 10-ти.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все вышеперечисленное составляет предмет отдельной работы, но уже можно сделать вывод о том, что лидарные сигналы с высот ионосферы по порядку величины соответствуют сделанным оценкам. И наблюдавшуюся неоднократно в 2008 г. на Камчатке во время геомагнитных возмущений корреляцию лидарных сигналов с плотностью плазмы в максимуме слоя F2 можно объяснить рассеянием на возбужденных атомах.

Приложение

П 1. Оценка скорости ионизации, производимой высыпавшимися электронами

Спорадические слои Es, приведенные на рис. 5, появлялись во время лидарных наблюдений на высотах ~150 км. Скорость ионизации электронами в этой области высот может быть оценена из следующих соображений. Полагая, что до высот 150 км выполняется условие фотохимического равновесия, а доля ионов O⁺ на 150 км еще мала по сравнению с содержанием молекулярных ионов, для оценок по порядку величины

можно не учитывать наличие ионов O⁺ записать условие фотохимического равновесия в виде

$$N_e = ((q(O_2) + q(N_2))/\alpha)^{1/2},$$

$$\text{или } q = q(O_2) + q(N_2) = \alpha N_e^2,$$

где $q(O_2)$ и $q(N_2)$ – скорость ионизации O₂ и N₂ соответственно; α – коэффициент диссоциативной рекомбинации, который для приближенных оценок для средних и низких широт может быть принят равным [Деминов, 2008]:

$$\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2)/2, \quad \alpha_1 = (3.5 \pm 0.5) \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.69},$$

$$\alpha_2 = 1.95 \times 10^{-7} (300/T_e)^{0.70};$$

$N_e = 3 \times 10^4$ 1/см³ – плотность электронов, изменяющаяся АИС; T_e – температура электронов.

Для ночных условий и высоты 150 км можно считать $T_e = T_i = T_n$. Здесь T_e , T_i , T_n – соответственно температуры электронов, ионов и нейтральной компоненты плазмы. Согласно данным модели NRLMSIS-00 [Picone et al., 2002] на высоте 150 км для широты и долготы Камчатки ночью в марте температура $T_n \sim 700$ К.

Полагая $T_e = T_n$, получаем $\alpha_1 = 1.95 \times 10^{-7}$; $\alpha_2 = 1.08 \times 10^{-7}$, $\alpha = 1.51 \times 10^{-7}$ (см³/с).

Тогда для скорости ионизации на высоте 150 км получаем $q = 1.36 \times 10^2$ см³/с.

В работе [Деминов и Хегай, 1980] приведены высотные профили скорости ионизации, нормированные на интегральный поток высыпавшихся электронов, в области высот 80–300 км. Для максвелловского спектра максимум ионизации, производимой электронами на высоте 150 км, соответствует потоку электронов с характерной энергией $E_0 \sim 0.5$ кэВ.

Расчеты по формуле для скорости ионизации электронами, приведенной в работе [Деминов, 2008], показывают, что для $E_0 = 0.5$ кэВ на высоте 200 км скорость ионизации уменьшится в ~1.5 раза, на высоте 200 км – в ~3 раза и на высоте 300 км – в 7.5 раз. В интервале высот 200–300 км можно ожидать скорости ионизации порядка 20–90 1/см³/с.

П 2. Оценка статистической значимости коэффициента корреляции

Обозначим суммарные сигналы с высот 150–200 и 200–300 км соответственно за X и Y. Исходные данные имеют значения:

X: 153.9; 159.46; 64.31; 98.02; 93.99; 116.95; 91.18; 120.92; 134.81; 75.34; 71.71; 40.02; 95.09; 108.13; 171.24; 118.93; 184.02; 167.09; 163.29; 164.12; 156.86; 165.62; 191.71; 131.88; 160.02; 142.5; 140.71; 15.75.

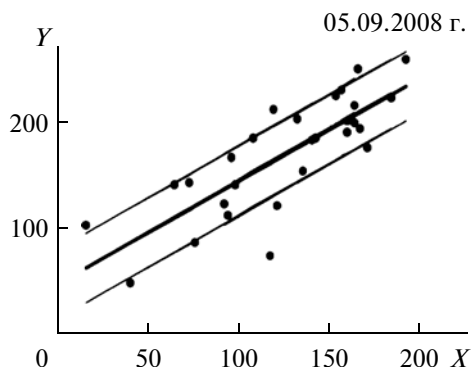


Рис. 6. Линия регрессии для лидарных данных, полученных 05.09.2008 г.

Y : 223.92; 189.28; 139.09; 140.01; 109.26; 70.84; 121.24; 118.55; 152.53; 85.04; 141.23; 46; 164.57; 184.13; 174.28; 211.5; 222; 192.6; 198.99; 215.08; 228.77; 250.14; 258.36; 201.5; 200.44; 182.79; 180.92; 100.6.

Размерность данных $n = 28$. Математическое ожидание и дисперсия для X и Y :

$$MX = 124.9, \quad DX = 1989.8, \quad MY = 167.99, \\ DY = 2964.94.$$

Коэффициент корреляции $r_{xy} = 0.8$.

Табличное значение распределения Стьюдента при уровне значимости 0.10 и $n = 28$ $T_{\alpha}(0.10, n - 2) \approx 1.706$. Рассчитанное по имеющимся данным значение $T_n = r_{xy} \cdot ((n - 2)/(1 - r_{xy}^2))^{1/2} \approx 6.85$. Поскольку $|T_n| > T_{\alpha}$, можно сделать вывод о том, что значение r_{xy} статистически значимо, и 90% доверительный интервал для r_{xy} имеет значения:

$$\left(r_{xy} - T_{\alpha} \left(1 - r_{xy}^2 \right) / n^{1/2}, \right. \\ \left. \left(r_{xy} + T_{\alpha} \left(1 - r_{xy}^2 \right) / n^{1/2} \right) \right) = (0.68 - 0.92).$$

Уравнение регрессии Y на X имеет вид: $y = 0.98x + 45.98$.

На рисунке 6 приведены значения массивов X , Y и линия регрессии Y на X с ошибкой в одно

стандартное отклонение, определяемое как $\sigma = (\sum (y - Y_i)^2 / (n - 2))^{0.5}$.

Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН № 12-1-П10-01 и 12-1-ОФН-16, гранта РФФИ № 10-05-00907-а, интеграционного проекта СО РАН № 106.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авакян С.В., Серова А.Е., Воронин Н.А. Роль ридберговских атомов и молекул в верхней атмосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 37. № 3. С. 99–105. 1997.
- Делоне Н.Б. Ридберговские атомы // Соровский образовательный журнал. № 46. С. 64–70. 1998.
- Деминов М.Г. Ионосфера Земли // Плазменная гелиогеофизика. Ред. Зеленый Л.М., Веселовского И.С. М: Физматлит, Т. 2. С. 92–163. 2008.
- Деминов М.Г., Хегай В.В. Аналитическая аппроксимация скорости ионизации авроральными электронами // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 20. № 1. С. 145–147. 1980.
- Шпольский Э.В. Атомная физика. М: Наука, Т. 2. 438 с. 1984.
- Энциклопедия физики // Ред. Прохоров А.М. Т. 4. С. 277–282. М.: Большая Российская Энциклопедия, 1994.
- Avakyan S.V., Voronin N.A. Condensation process in the low atmosphere and microwave radiation of the Sun and ionosphere // Proc. 6-th Intern. Conf. Problems of Geocosmos. Saint-Petersburg. May 23–27. P. 23–27. 2006.
- Avakyan S.V. Collisions of Rydberg-excited neutrals in the ionosphere and microwave radiation // J. Opt. Technol. V. 73. № 4. P. 302–303. April 2006.
- Banks P.M., Kockarts G. Aeronomy. N.Y.: Acad. Press. 314 p. 1973.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. V. 107. № A12. P. 1468–1483. 2002.
- Tarr S.M., Shiovone J.A., Friend R.S. Long-lived high-Rydberg molecules formed by electron impact: H₂, D₂, N₂ and CO // J. Chem. Phys. V. 74. № 5. P. 2869–2878. 1981.