

## Лидарные сигналы верхней атмосферы и возможный механизм их формирования

В.В. Бычков, Ю.А. Непомнящий, А.С. Пережогин, Б.М. Шевцов\*

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН  
684034, Камчатский край, Елизовский р-н, с. Паратунка, ул. Мирная, 7*

Поступила в редакцию 3.10.2014 г.

Представлены новые экспериментальные данные, подтверждающие эпизодическое появление корреляции лидарных сигналов обратного рассеяния света от области высот 150–300 км с содержанием плазмы в ночном слое  $F_2$  ионосферы. Приводятся результаты анализа данных лидарных наблюдений за 2008–2014 гг., делается вывод, что эти корреляции возникают при появлении в ионосфере дополнительных источников ионизации. Обсуждается гипотеза, что возможным механизмом формирования этих сигналов является резонансное рассеяние на возбужденных ионах атома азота.

*Ключевые слова:* зондирование, атмосфера, лидар, рассеяние; sounding, atmosphere, lidar, scattering.

### Введение

Считается общепринятым, что при рэлеевском лидарном зондировании атмосферы лидарные сигналы обратного рассеяния от области высот более 100 км отсутствуют. В работе [1] по данным лидарных и ионосферных наблюдений за 28 марта 2008 г. показано, что в этот день разница суммарного сигнала от области высот 200–300 км, за вычетом независимо измеренного фонового сигнала, коррелирует с содержанием плазмы в области максимума ночного слоя  $F_2$  ионосферы. Предлагается возможный физический механизм, объясняющий эти корреляции, – формирование рассеяния на атомах возбужденных электронным ударом [1].

Дополнительными экспериментами, проведенными в апреле–мае 2014 г., установлено, что частота сигнала от области верхней атмосферы близко совпадает с частотой зондирующего излучения и имеет ширину спектра не более 1 нм. Это позволяет предположить, что имеет место резонансное рассеяние. Корреляция лидарного сигнала с плотностью плазмы в ночном слое  $F_2$  ионосферы означает, что рассеяние может происходить на ионах. Определение возможного компонента среди ионов верхней атмосферы и обоснование его роли в формировании лидарных отражений составляют предмет настоящей статьи.

### Аппаратный комплекс

Нами использованы экспериментальные данные, полученные на лидарной и ионосферной станциях, расположенных на Камчатке, с. Паратунка (52,9° с.ш.,

158° в.д.). Аппаратный комплекс описан в работе [2]. В приемной системе использовались фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) Hamamatsu H8259-01, счетчик фотонов Hamamatsu M8784. Применялись светофильтры с шириной полосы пропускания на полувывсоте, равной 3 и 1 нм, и одинаковым пропусканием  $T > 65\%$ . Для исключения сигналов ближней зоны использовалось электронное запирающее ФЭУ импульсом длительностью 140 мкс. Сигнал регистрировался в течение 4 мс с шагом 10 мкс, что соответствует области высот 21–600 км с шагом 1,5 км.

Величина фонового сигнала измерялась с 20-й по 24-ю мс с шагом 10 мкс после посылки каждого лазерного импульса. Во время измерения фонового сигнала зондирующий импульс находится в области высот 6000–6600 км, фоновый сигнал не содержит импульсов последствия и обеспечивается хорошим накоплением данных. Начало измерения фона задается программно и, как показал опыт работы, может быть задано любым из области 10–95 мс. Применение этого метода измерения шума позволило выделить на хорошо усредненном фоне слабые сигналы от области верхней атмосферы.

### Результаты наблюдений

Подробный анализ результатов наблюдений и геофизической обстановки 28 марта 2008 г. приведен в работе [1]. На рис. 1 представлен основной экспериментальный результат, взятый из этой работы. В ночное время с 13:00 и до 14:30 UT отмечается небольшое, но резкое возрастание критической частоты слоя  $F_2$ , сопровождающееся уменьшением действующей высоты слоя  $F_2$  на величину около 40 км. Одновременно на лидарном сигнале, суммированном по области высот 200–300 км, наблюдается всплеск, совпадающий во времени и по форме со всплеском критической частоты слоя  $F_2$  ионосферы.

\* Василий Валентинович Бычков (vasily.v.bychkov@gmail.com); Юрий Александрович Непомнящий (vicesam@gmail.com); Андрей Сергеевич Пережогин (d72156@gmail.com); Борис Михайлович Шевцов (bshev@ikir.ru).

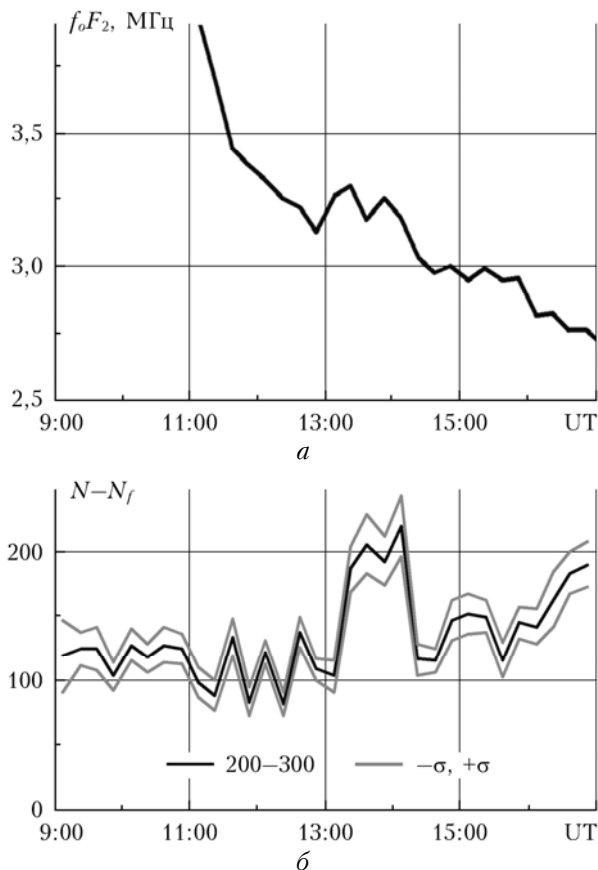


Рис. 1. Критическая частота слоя  $F_2$  ионосферы  $f_oF_2$  (а) и суммированный по области высот 200–300 км лидарный сигнал  $N-N_f$  (б). Средняя линия – лидарный сигнал, верхняя и нижняя линии – средноквадратическое отклонение

Для геофизической обстановки в эту ночь характерно наличие сохраняющегося геомагнитного возмущения после бури, имевшей максимум 26 марта. Во время наблюдений значения местных геомагнитных  $K$ -индексов были равны 4. По данным ионосферной станции, одновременно зарегистрировано появление спорадических слоев  $E_s$  корпускулярного типа на высотах 130–150 км с критической частотой  $f_oE_s$  1,5–1,6 МГц.

Примеры похожих корреляций, имевших место в сентябре и ноябре 2008 г., приведены в работе [2]. Наблюдение лидарных сигналов верхней атмосферы требует наличия хорошей погоды, отсутствия Луны, что обеспечивает минимальный уровень фонового сигнала, а также появления высыпаний мягких электронов в ионосферу над местом наблюдения. Такие условия на среднеширотной лидарной станции Камчатки реализуются нечасто.

Для примера на рис. 2 представлены результаты наблюдений от 1 июля 2010 г. Слои  $E_s$  на высотах 100–110 км регистрировались в этот день в течение всех 3 ч наблюдений. Возрастание  $f_oF_2$  в ночное время может быть объяснено высыпанием частиц с энергиями в сотни эВ. При увеличении содержания частиц с энергиями в единицы кэВ происходит рост

ионизации области 100–150 км [3] и формирование слоев  $E_s$  в области ее максимума. Отличием ночных корпускулярных слоев  $E_s$  от плоских  $E_s$  ветровой природы являются их несколько большая толщина и подковообразная форма следа на ионограмме, характерная для дневного регулярного слоя  $E$ .

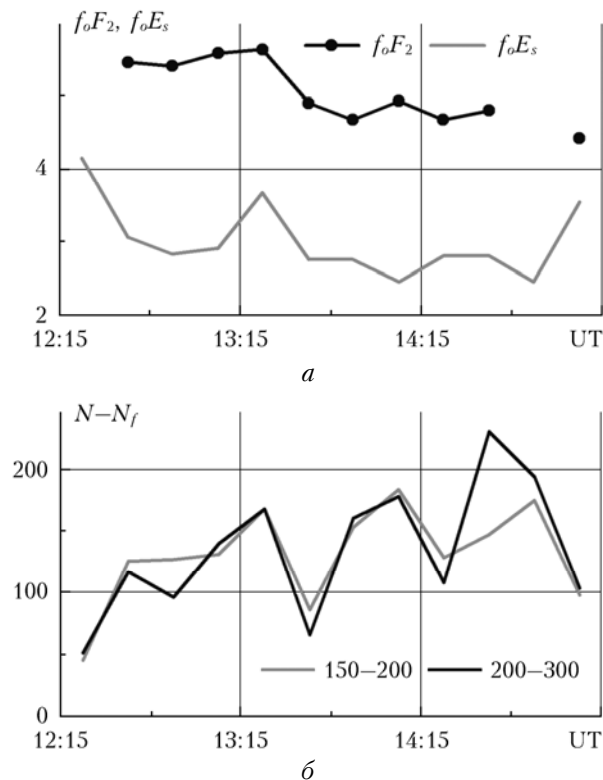


Рис. 2. Критические частоты  $f_oF_2$  и  $f_oE_s$  1 июля 2010 г. (а) и лидарный сигнал за вычетом фона от областей высот 150–200 и 200–300 км (б)

На графике лидарного сигнала (рис. 2, б) хорошо выделяются максимумы в 13:15, 14:00 и 14:45 UT. Первые два совпадают во времени с максимумами  $f_oF_2$  (рис. 2, а). В 14:45 UT значение  $f_oF_2$  не определено в связи с диффузностью слоя  $F_2$ . По ионограммам можно заключить, что значение  $f_oF_2$  в 14:45 UT по меньшей мере заметно не уменьшалось. Можно считать, что корреляция  $f_oF_2$  с лидарным сигналом имела место во всем интервале времени с 12:30–15:00 UT.

В 13:15 UT наблюдается корреляция лидарного сигнала как с  $f_oF_2$ , так и с  $f_oE_s$ . Это обстоятельство дополнительно подтверждает корпускулярную природу слоев  $E_s$ . Уменьшение  $f_oE_s$  (при высоте слоя  $E_s = 100$ –110 км) в 14:00 и 14:45 UT объясняется снижением в потоках количества высыпавшихся электронов с энергиями в единицы кэВ. На высотах области  $E$  высыпавшиеся электроны формируют достаточно узкие области заметно повышенной ионизации. Наличие корреляции  $f_oE_s$  с  $f_oF_2$  при этом необязательно, это определяется энергетическим спектром высыпавшихся частиц.

По погодным условиям на лидарной станции Камчатки в год проводится 40–50 сеансов лидарных

наблюдений. Анализ данных за 2008–2013 гг. показал, что корреляции  $f_oF_2$  с лидарным сигналом от области слоя  $F$  ионосферы удавалось наблюдать от 2 до 5 раз ежегодно, что составляет 5–10% от общего числа проведенных наблюдений. Высыпания электронов в атмосферу на средних широтах случаются относительно редко, и они разнятся по продолжительности, интенсивности и спектру высыпавшихся электронов. При наличии Луны фоновый сигнал может возрасти на порядок и выделить лидарный сигнал с ионосферных высот в этих случаях не представляется возможным. Оба эти фактора определяют возможность выявления корреляций лидарного сигнала с  $f_oF_2$  ионосферы. Полученное отношение числа выявленных случаев корреляций к общему числу сеансов зондирования, равное 5–10%, примерно соответствует условиям наблюдений.

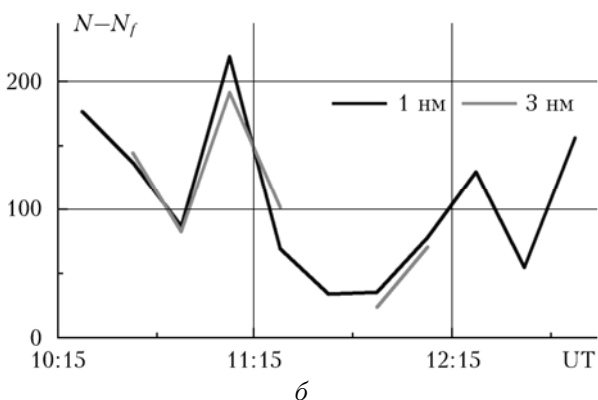
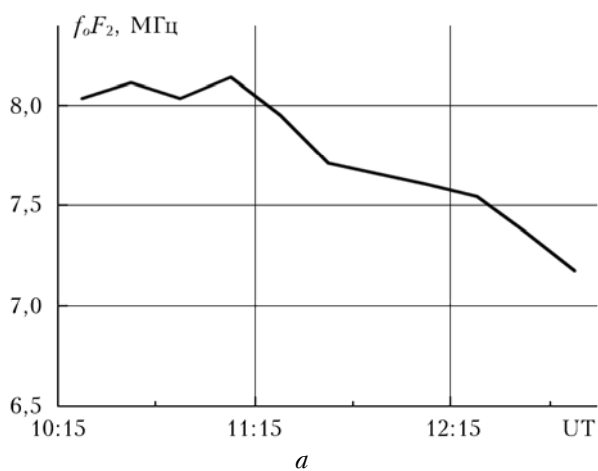


Рис. 3. Критическая частота слоя  $F_2$  ионосферы  $f_oF_2$  (а) и лидарные сигналы с различной степенью фильтрации, суммированные по области 200–300 км (б)

Из наблюдений за 2008–2013 гг. следует, что повышенное светорассеяние от верхней атмосферы может наблюдаться как во время геомагнитных возмущений, так и в магнитоспокойных условиях [2]. В большинстве случаев возрастание лидарных сигналов сопровождалось появлением  $E_s$  корпускулярного типа в области высот 100–150 км. Это свидетельствует о наличии высыпаний мягких электронов (сотни эВ – единицы кэВ) в атмосферу Камчатки

во время лидарных наблюдений. Причину повышенного рассеяния верхней атмосферы нужно искать в повышении ионизации области 150–300 км высыпавшимися электронами.

С апреля 2014 г. лидарные наблюдения проводились с использованием лазера YG-982E с длиной волны 532 нм и энергией в импульсе 1,0–1,1 Дж. Сигнал приемника, поделенный пополам, поступал на два ФЭУ через светофильтры с полосами пропускания на полувьсоте 1 и 3 нм и одинаковыми коэффициентами пропускания  $T > 65\%$ , что позволило оценить спектральную ширину сигнала.

На рис. 3 представлены результаты, полученные 14 мая 2014 г. В этот день спорадические слои  $E_s$  наблюдались в 11:15, 12:30 и 12:45 UT с критическими частотами 2, 1,8 и 1,55 МГц соответственно. Для ночных условий тип всех наблюдавшихся слоев  $E_s$  может быть классифицирован как корпускулярный. Этим моментам времени соответствуют максимумы в ходе лидарного сигнала (рис. 3, б), тогда и отмечались локальные повышения  $f_oF_2$  (рис. 3, а).

Согласно рис. 3, б имеет место хорошее совпадение сигналов, полученных приемниками с узким и широким светофильтрами. Это дает основания полагать, что лидарный сигнал имеет частоту, содержащуюся в спектре зондирующего импульса, и ширину спектра не более 1 нм.

Проверка спектра излучения атомарного кислорода и его ионов, которые доминируют на высотах слоя  $F_2$ , показала, что ближайшие линии излучения кислорода лежат вблизи 533 нм и атомарный кислород не может заметно влиять на формирование сигнала обратного рассеяния.

## Обсуждение результатов

Вторая гармоника Nd:YAG-лазера имеет полосу излучения  $(532,08 \pm 0,07)$  нм. Поиск в базе данных [4] показал, что в эту полосу попадают три линии дипольных переходов ионов атома азота из возбужденных состояний с главным квантовым числом  $n = 3$ .

В работе [5] приводятся результаты наблюдений резонансного рассеяния на ионах  $N_2^+$  в области высот от 100 до 300 км. На высоте 200 км  $[N^+]$  (концентрация ионов  $N^+$ ) примерно равна  $[N_2^+]$ , а на высоте 300 км  $[N^+]$  превышает  $[N_2^+]$  более чем на порядок [6]. Параметры лидарной системы, использованной в работе [5], – диаметр зеркала 100 см, частота лазера 20 Гц, суммирование по слоям 5 км – не отличаются кардинально от параметров нашего лидара – диаметр зеркала 60 см, частота лазера 10 Гц, суммирование по слоям 50 и 100 км. Одинаковый порядок значений накопленных сигналов обратного рассеяния позволяет считать возможность обнаружения рассеяния на ионах атомарного азота в области 200–300 км вполне вероятной.

В таблице приведены частоты линий излучения иона атома азота в полосе излучения Nd:YAG-лазера. Используются стандартные обозначения [4]:  $NII$  – однократно ионизованный ион  $N^+$ ,  $NIII$  – дважды ионизованный ион  $N^{++}$ .

### Дипольные переходы возбужденных ионов атома азота в полосе излучения Nd:YAG-лазера

Компонент	Длина волны в воздухе, нм	$A_{ki}$ , $c^{-1}$	Нижний уровень	Терм	$J$	Верхний уровень	Терм	$J$
НИ	532,0202	4,20e + 07	$2s2p^2(^4P)3p$	$^5P^0$	2	$2s2p^2(^4P)3d$	$^5P$	1
НИИ	532,0870	5,68e + 07	$2s2p(^3P^0)3p$	$^2D$	5/2	$2s2p(^3P^0)3d$	$^2F^0$	7/2
НИ	532,0958	2,52e + 07	$2s2p^2(^4P)3p$	$^5P^0$	1	$2s2p^2(^4P)3d$	$^5P$	2

Примечание.  $A_{ki}$  — вероятность спонтанного перехода,  $c^{-1}$ ;  $J$  — полный момент состояния.

На рис. 4 показана верхняя половина (начиная с уровня половины высоты спектра) схемы расположения линий излучения иона атома азота относительно спектра излучения лазера. Расчет ширины полосы излучения ионов проведен с учетом доплеровского уширения линий при температуре 800 К.

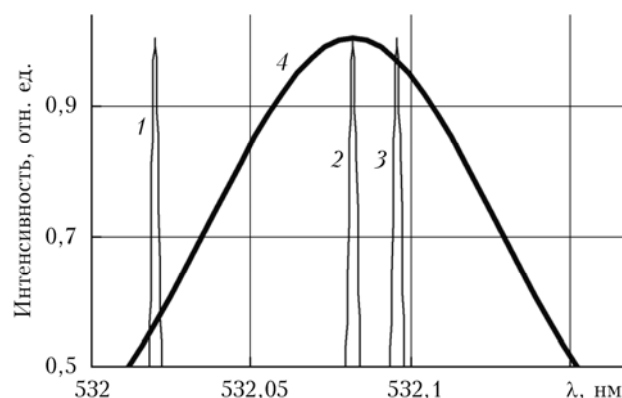


Рис. 4. Схема линий излучения ионов азота относительно спектра YAG:Nd-лазера: 1 — 532,0202; 2 — 532,087; 3 — 532,0958 нм; 4 — YAG:Nd

Первая из этих линий находится на краю полосы ( $532,08 \pm 0,07$ ) нм, а две другие попадают в ее центр. Все три перехода могут претендовать на роль резонансных рассеивателей, однако первый будет возбуждаться менее эффективно, чем третий, а концентрация НИИ (линия 2,  $N^{++}$ ) существенно меньше, чем у НИ ( $N^+$ ). Наибольший вклад в наблюдавшееся рассеяние может вносить третий переход.

На высотах 200–300 км преобладает атомарный кислород. Концентрацию  $O^+$  можно оценить по электронной концентрации ночного слоя  $F_2$  ионосферы как  $10^4$   $см^{-3}$ . Основным источником иона  $N^+$  является реакция  $O^+$  с атомом  $N(^2D)$ , образующимся в результате диссоциации молекулярного азота. Поэтому можно считать, что на высотах 200–300 км концентрация  $N^+$  пропорциональна концентрации  $O^+$ , составляет примерно 1% от концентрации  $O^+$  [6] и может быть принята равной  $10^2$   $см^{-3}$ . При этом сечение резонансного рассеяния на длине волны 532 нм пропорционально квадрату длины волны, что равно  $0,25 \cdot 10^{-12}$   $м^2$ . Оценки, проведенные с учетом параметров лидарной системы, показывают, что наблюдавшийся сигнал по порядку величины им соответствует [7].

### Заключение

В работах [1, 2] обсуждалась гипотеза об участии высоковозбужденных атомов и молекул в формировании лидарных сигналов с ионосферных высот. Конкретные механизмы рассеяния на этих объектах не были предложены. По результатам проведенных дополнительных исследований эта гипотеза должна быть изменена и конкретизирована. Следует сделать вывод о том, что рассеяние лазерного излучения с длиной волны 532 нм в верхней атмосфере может быть обусловлено резонансным рассеянием на возбужденных ионах атома азота с главным квантовым числом  $n = 3$ . Об участии высоковозбужденных ионов атома азота в этом процессе можно говорить лишь в том смысле, что при каскадной релаксации к основному состоянию они будут проходить через состояние с  $n = 3$ , в том числе и через состояния, представленные в таблице.

Это рассеяние имеет место всегда, но в обычных условиях оно мало. Постоянная составляющая в сигнале (порядка 100 фотонов за 15 мин, см. рис. 1) может быть обусловлена в том числе и импульсами последствие. Сигналы с накоплением 15 мин на последствие не корректировались с целью сохранения достоверности исходных данных.

Во время высыпаний мягких электронов рассеяние возрастает в несколько раз и может быть выявлено по корреляциям с содержанием плазмы в ночном слое  $F_2$  ионосферы.

Работа выполнена при поддержке проекта ДВО РАН № 12-I-ОФН-16, Интеграционного проекта СО РАН № 106, гранта РФФИ № 13-05-01036а.

1. Бычков В.В., Шевцов Б.М. Динамика лидарных отражений верхней атмосферы Камчатки и ее связь с явлениями в ионосфере // Геомагнет. и аэрон. 2012. Т. 52, № 6. С. 837–844.
2. Бычков В.В., Непомнящий Ю.А., Пережогин А.С., Шевцов Б.М. Лидарные отражения верхней атмосферы Камчатки по результатам наблюдений 2008 г. // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 111–116.
3. Деминов М.Г. Ионосфера Земли // Плазменная гелиогеофизика / Под ред. академика РАН Л.М. Зеленого и д.ф.-м.н. И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 92–163.
4. NIST ASD (1978) URL: [http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)
5. Collins R.L., Su L., Lummerzheim D., Doe R.A. Investigating the Auroral Thermosphere with  $N_2^+$  Lidar // Characterising the Ionosphere: Meeting Proc. RTO-MP-IST-

056, Paper 2. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. 2006. P. 2-1–2-14.  
6. *Richards P.G.* Reexamination of ionospheric photochemistry // *J. Geophys. Res. A.* 2011. V. 116, N 08307. DOI: 10.1029/2011JA016613.

7. *Bychkov V.V., Nepomnyashchii Yu.A., Perezhogin A.S., Shevtsov B.M.* Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka on observations in 2008–2014 // *Earth, Planets Space.* 2014. V. 66, N 150. DOI: 10.1186/s40623-014-0150-6.

*V.V. Bychkov, Yu.A. Nepomnyashchii, A.S. Perezhogin, B.M. Shevtsov.* **Lidar returns from upper atmosphere and possible mechanism of their formation.**

New experimental data that confirm episodic occurrence of the correlation of light backscattering lidar signals from a height region of 150–300 km with plasma content in nighttime ionosphere  $F_2$  layer are presented. Analysis results of lidar observation data for 2008–2014 are shown. The conclusion is drawn that these correlations occur when additional sources for ionosphere ionization appear. A hypothesis that the possible mechanism for formation of these signals is the resonance scattering at excited ions of nitrogen atom is under discussion.