

Лидарные исследования рассеяния верхней атмосферы на возбужденных ионах атомарного кислорода

Бычков В. В., Пережогин А. С., Середкин И. Н., Шевцов Б. М.

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка, Елизовского района, Камчатского края
email: vasily.v.bychkov@gmail.com

Представлены результаты лидарного исследования рассеяния верхней атмосферы. Наблюдения проводились на длине волны 561.106 нм, что соответствует резонансному переходу между возбужденными состояниями $2s^2 2p^2(^3P)4p \rightarrow 2s^2 2p^2(^1S)3s$ иона атомарного кислорода. Обсуждается возможность использования лидарного метода в исследованиях ионосферы. Физической основой этого метода может быть резонансное рассеяние на возбужденных ионах верхней атмосферы.

Ключевые слова: ионосфера, лидар, зондирование, рассеяние, атмосфера

Введение.

В работах [1-3] по данным ионосферных и лидарных наблюдений на длине волны 532 нм показано, что во время высыпаний сверхтепловых (0.1-10 кэВ) электронов в атмосферу суммарный лидарный сигнал от областей высот верхней атмосферы (150-300 км), может коррелировать с содержанием плазмы в области максимума ночного слоя F2 ионосферы.

Анализ геофизической обстановки, сопровождавшей явление, позволил сделать вывод о том, что возможный физический механизм, объясняющий эти корреляции – резонансное рассеяние на возбужденных ионах атома азота, возникающих во время высыпаний электронов в ионосферу. Содержание ионов атома азота на ионосферных высотах составляет единицы процентов днем, и пренебрежимо мало ночью. В работе представлены результаты регистрации резонансного рассеяния на возбужденных ионах атомарного кислорода, являющегося основным заряженным компонентом в слое F2 ионосферы.

Аппаратный комплекс и методика измерений.

В наблюдениях использовался двухчастотный лидар с лазером Brilliant-V для генерации излучения 532 нм и лазером на красителях TDL-90 с лазером накачки YG982E для генерации излучения 561.106 нм. Оба лазера имеют частоту 10 Гц. Энергия импульса на длине волны 532 нм составляла ~ 400 мДж и около 150 мДж на длине волны 561.106 нм.

Приемный телескоп лидара имеет параболическое зеркало диаметром 60 см. Угол зрения приемника 0.1-1 мрад. Через линзу приемного блока принятый телескопом сигнал в виде параллельного пучка подается в световод. В световоде установлена спектроделительная пластина под углом 45 градусов к направлению распространения пучка. Излучение с длиной волны больше 532 нм пластиной пропускается, излучение с длиной волны 532 нм и меньше, отражается под углом 90 в другой световод, на выходе которого установлен интерференционный светофильтр для длины волны 532 нм с шириной полосы пропускания 1 нм на половине высоты. После светофильтра световой поток направляется на фотокатод ФЭУ Hamamatsu H8259-01, подключенный к счетчику фотонов Hamamatsu M8784. Таким способом реализуется канал регистрации резонансного рассеяния на возбужденных ионах атомарного азота на длине волны 532 нм. Из данных этого канала получается также информация об аэрозольном наполнении области высот 25-80 км.

Длинноволновая часть принятого сигнала направлялась во второй канал. На первом этапе работ, она фокусировалась на щель монохроматора Sp-2500i, за выходной щелью которого устанавливался второй ФЭУ, Hamamatsu H8259-01. Монохроматор калибровался по линиям ртутной лампы с использованием камеры PicoStar HR. По монохроматору калибровался лазер TDL-90, после чего камера с монохроматора снималась, и на ее место устанавливались щель и ФЭУ. В связи со сложностью проведения калибровок по этой

схеме с февраля 2016 г. регистрация сигнала по этому каналу проводится по обычной схеме, с использованием светофильтра на длину волны 561 нм. Монохроматор с камерой используются для калибровки лазера TDL. Этот канал служит для регистрации резонансного рассеяния на ионах атомарного кислорода и определения характеристик аэрозольных слоев в области высот 15-70 км.

Выбор длины волны зондирующего излучения для ионов атомарного кислорода сделан с учетом результатов анализа спектра иона атомарного кислорода и выбора красителя радомин-590 (Rh-590) для лазера TDL-90, обеспечивающего наиболее эффективную передачу энергии при накачке излучением с длиной волны 532 нм. В спектр красителя хорошо попадает линия кислорода 561.106 нм, и чуть хуже линия 558.322 нм.

Величина фонового сигнала измерялась с 20-й по 24-ю мс с шагом 10 мкс после посылки каждого лазерного импульса. Измеренный таким способом фоновый сигнал не содержит импульсов последствия, и обеспечивается хорошим накоплением данных.

Контроль состояния ионосферы проводился по данным ионозонда "Парус", заменившего Автоматическую ионосферную станцию (АИС) в августе 2015 г.

Результаты наблюдений.

Плохие погодные условия 2015 года в сравнении со всеми предыдущими годами лидарных наблюдений (2008 - 2014), позволили проводить лидарные наблюдения только с октября 2015 года. Как отмечалось в работе [1] условия для наблюдения резонансного рассеяния на среднеширотной лидарной станции Камчатки реализуются нечасто, обнаружить рассеяние на ионах атомарного азота удавалось от 2 до 5 раз в году.

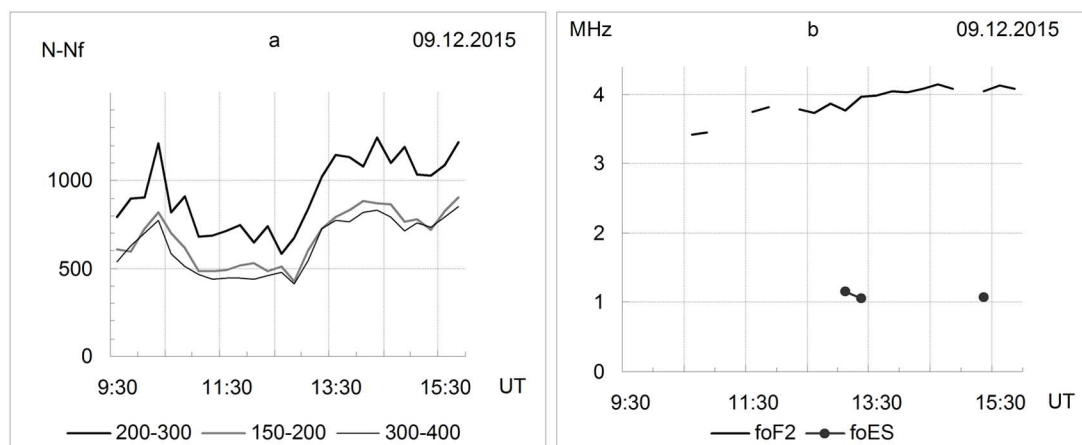


Рис. 1. Лидарный "сигнал-фон" от слоев 150-200, 200-300 и 300-400 км (а) и критические частоты слоев F2 и Es (b) во время лидарных наблюдений 9 декабря 2015 года.

Первые результаты зондирования с использованием приемной системы регистрации излучения на длине волны 561.106 нм приведены на рисунке 1. По рисунку 1 видно, что наблюдается высокая корреляция между суммарным сигналом от слоев 150-200, 200-300 и 300-400 км между собой, что не характерно для сигналов с больших высот. В некоторые дни наблюдений, например, 7 октября 2015 г. отмечалась также высокая, с коэффициентом порядка 0.9, корреляция между значениями foF2 ионосферы и значениями фонового сигнала на длине волны 561.106 нм, что объяснимо. С увеличением скорости ионизации в ночной ионосфере увеличивается свечение ночного неба в линии 561.106 нм.

Согласно данным рисунка 1а наблюдался синхронный рост лидарного сигнала во всей области высот 150-400 км в 10:15 UT и после 12:45 UT. Коэффициент корреляции между суммированными по слоям сигналами рис. 1а превышает значения 0.9.

Заметных корреляций для лидарных сигналов на длине волны 532 нм не отмечено.

Геомагнитная обстановка 9 декабря 2015 г. оставалась спокойной во все время наблюдений.

Обсуждение результатов.

Согласно ионосферным данным для слоя F2 во все время наблюдений 09.12.2015 была характерна высокая диффузность (F-рассеяние), и в большей части случаев определить точное значение foF2 не представлялось возможным. Диффузность слоя F2 объясняется наличием в слое неоднородностей, причиной которых могут быть в числе других и выпадения ионизирующих частиц. В целом наблюдался рост foF2 в ночных условиях, что также свидетельствует о появлении дополнительной ионизации. Слабо выраженные ночные Es появлялись на ионограммах с 12:30 до 15:15 UT (рисунок 1b). Нормальной интенсивностью отличался только слой в 15:15 UT, что соответствует во времени росту лидарного и фонового сигнала в указанный промежуток времени.

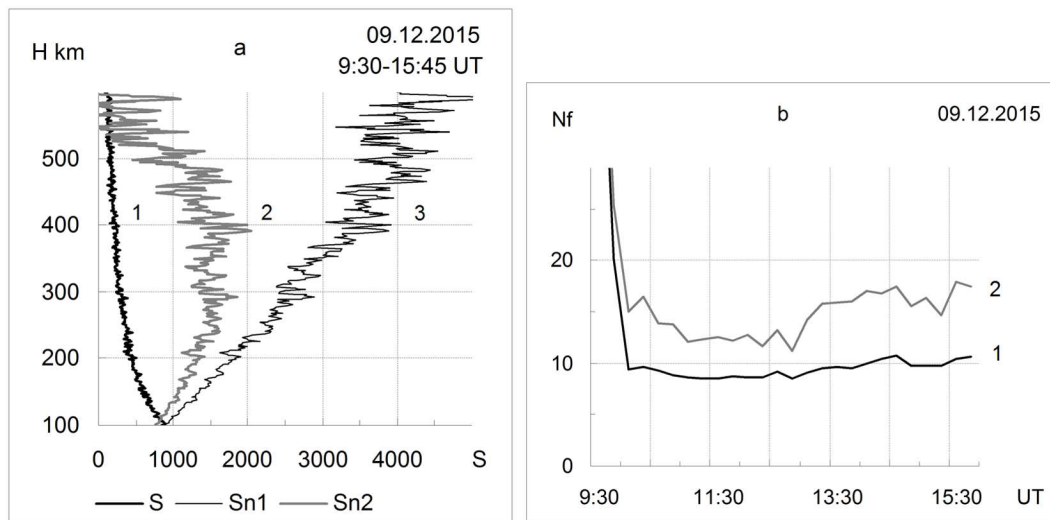


Рис. 2. а - суммарный лидарный сигнал S и нормированные лидарные сигналы Sn, б - фоновый сигнал, измеренный в интервале 20-24 мс после посылки импульса (1) и, среднее значение сигнала, измеренное в интервале 3-4 мс (2).

На рисунке 2а представлен суммарный за ночь сигнал S (кривая 1) за вычетом измеренного фона. В работе [4] приведены результаты исследования резонансного рассеяния на ионах молекулярного азота. Можно утверждать, что с учетом отличий распределения ионов молекулярного азота от распределения ионов атомарного кислорода, кривая суммарного лидарного сигнала S хорошо соответствует кривой сигнала, приведенного в работе [4].

На рисунке 2б приведен фоновый сигнал, отнесенный к интервалу 10 мкс (что соответствует времени прохождения слоя высотой 1.5 км и ширине ворот счетчика). Цифрой 1 обозначен сигнал, измеренный с 20-й по 24 мс после посылки каждого лазерного импульса, цифрой 2 – сигнал, измеренный с 3-й по 4 мс, т.е. средний сигнал от области 450-600 км. Сравнение кривой 2 рисунка 2б с рисунком 1а показывает, что сигнал от области 450-600 км повторяет форму сигнала от слоев в области 100-400 км, содержит сигнал резонансного рассеяния и не может использоваться в качестве фонового. В обычных условиях отличие полученных такими способами сигналов очень мало.

На кривых 2 и 3 рисунка 2а представлен суммарный за ночь “сигнал-фон”, нормированный на величину $(H/100)^2$, где H – высота в километрах. Нормировка выбрана из тех соображений, что угол зрения на зеркало с больших высот уменьшается как $\sim 1/R^2$, а уменьшение интенсивности потока лазерного излучения с высотой компенсируется увеличением засвеченного объема.

Кривая 3 рисунка 2а рассчитана с учетом значений фона, представленных на кривой 1 рисунка 2б. Рост нормированного сигнала с высотой означает, что разница “сигнал-фон” содержит некоторую дополнительную составляющую. Эта дополнительная составляющая сигнала может состоять из импульсов последействия с характерным временем затухания в не менее чем единицы микросекунд. Такой порядок времени затухания имеет, например, последействие типа ионной обратной связи.

Результаты исследования влияния на лидарный сигнал импульсов последействия использованного в настоящей работе ФЭУ Hamamatsu H8259-01 приведено в работе [5]. В этой работе на данных лидарного зондирования атмосферы показано, что в первом приближении последействие может быть представлено экспонентой, полученной методом наименьших квадратов (НК) на сигнале в области высот $\sim 100-150$ км, вида $A \cdot \exp(B \cdot H) + C$, где H – высота. Метод хорошо себя зарекомендовал при корректировке сигнала в области высот 60-80 км при восстановлении профилей отношения рассеяния. Он позволяет устранить эффект относительно быстро затухающих процессов последействия. Процессы последействия описаны в работе [6], они могут быть сгруппированы по характеру процессов и времени действия относительно основного импульса. Характерные времена процессов последействия находятся в интервале от десятков наносекунд до микросекунд и даже секунд [6]. Как правило, результаты экспериментов по их исследованию представляются экспонентой или суммой экспонент.

Последействие представляет собой затухающий процесс. Поскольку сигналы молекулярного и аэрозольного рассеяния с высот больших 100 км отсутствуют, можно выделить затухающий сигнал последействия в виде экспоненты. В лидарных данных за 09.12.2015 методом НК выделена экспонента в области высот 100 - 400 км. Расчеты показали, что чисто экспоненциальная часть зависимости $A \cdot \exp(B \cdot H) + C$ последействия мала и слабо влияет на результат, сигнал спадает медленно и в качестве последействия в этой области высот можно использовать только константу. Значение константы C существенно влияет на ход кривой, но значение ее, полученное методом НК, завышено что приводит к отрицательным значениям нормированного сигнала. Последнее связано с тем, что исходные данные содержат помимо импульсов последействия сигнал резонансного рассеяния. Поэтому значение константы C подбиралось таким, чтобы на высоте 600 км нормированный сигнал был близок к нулю. Согласно модели ионосферы IRI на высоте 600 км содержание ионов O^+ уменьшается на порядок, по сравнению с их содержанием на высоте 300 км.

Результат приведен на рисунке 2а, кривая 2. Исходные данные кривой 2 сглажены методом скользящего среднего с окном 4.5 км. Кривая 2 соответствует профилю распределения концентрации ионов O^+ в ионосфере. Но фактически это кривая среднего содержания возбужденного состояния иона кислорода $2s^2 2p^2 ({}^1S) 3s$, время жизни которого составляет доли микросекунды. Профиль состоит из 213 200 измеренных значений, и содержит историю функции ионизации за 6.5 часов наблюдений.

По положению локальных максимумов в ходе профиля сигнала можно оценивать энергию высыпающихся электронов и их спектр. Для иллюстрации этого положения на рисунке 3а приведено распределение уровня сигнала S рисунка 2 в зависимости от высоты по лидарным данным с 15-минутным накоплением. На рисунке 3б представлены значения скорости ионизации, вызванной моноэнергетическим потоком электронов интенсивностью 10^8 $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, приведенные в работе [7]. Цифрами у кривых обозначена характерная энергия спектра в кэВ. Аналогичные расчеты, выполненные в предположении максвелловского распределения по энергиям, показывают, что в этом случае высота максимума скорости ионизации уменьшается, но значение максимальной скорости меняется мало [7].

Как следует из данных рисунков 1а и 2б среднее отношение сигнал/фон для сигналов с 15-минутным накоплением в области 300-400 км составляет значения порядка единицы, и это обстоятельство нужно учитывать при использовании данных с больших высот.

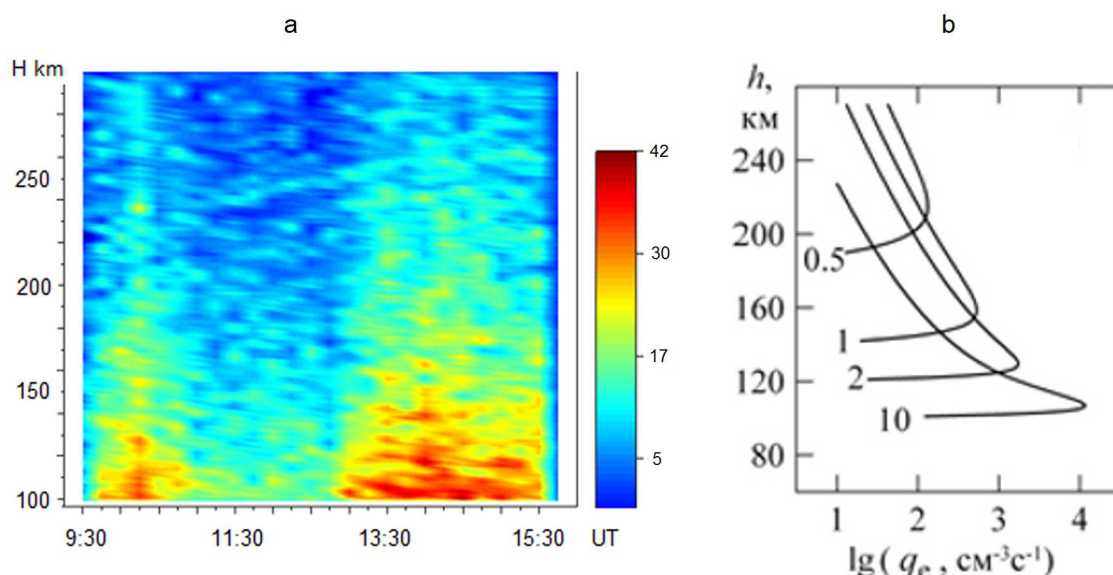


Рис. 3. Распределение уровня лидарного сигнала 09.12.2015 (а), и скорость ионизации в зависимости от энергии высыпающих электронов (б) [7].

Заключение.

Анализ полученных результатов позволяет сделать предварительные выводы:

- во время высыпаний электронов в ионосферу на высотах 150-250 км значения лидарного сигнала обратного рассеяния на длине волны 561.106 нм в разы превосходят значения лидарного сигнала на длине волны 532 нм от рассеяния на ионах атомарного азота. Что соответствует сделанным ранее оценкам [1, 2].

- лидарные наблюдения верхней атмосферы могут дать информацию о распределении заряженных компонент в ионосфере с существенно лучшим разрешением по пространству, чем ионосферные радары. Использующиеся для этих целей радары некогерентного рассеяния слишком дороги как сами по себе, так и в эксплуатации.

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

Литература

[1] Bychkov V. V., Nepomnyashchiy Y. A., Perezhogin A. S., Shevtsov B. M., “Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka and possible causes of their generation” *Atmospheric and Oceanic Optics*, 28:3 (2015), 210-214.

[2] Vasily V. Bychkov, Yuri A. Nepomnyashchiy, Andrey S. Perezhogin, Boris M. Shevtsov “Resonance scattering at excited atoms and ions of the upper atmosphere as a possible mechanism for ionosphere investigations” *Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 968073 (2015), doi: 10.1117/12.220596.

[3] Vasily V Bychkov, Yuri A Nepomnyashchiy, Andrey S Perezhogin, Boris M Shevtsov “Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka on observations in 2008-2014”, *Earth, Planets and Space*, 66:150 (2014), DOI: 10.1186/s40623-014-0150-6.

[4] Collins R.L., Su L., Lummerzheim D. Doe R.A. (2006) “Investigating the Auroral Thermosphere with N₂⁺ Lidar”, In *Characterising the Ionosphere* (PP. 2-1 – 2-14). Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 2. Neuilly-sur-Seine, France: RTO.

[5] Bychkov V. V. , Perezhogin A. S., Perezhogin, A. S, Shevtsov B. M., Marichev V. N., Matvienko G. G., Belov A. S. and Cheremisin A. A. “Lidar Observations of Aerosol Occurrence

in the Middle Atmosphere of Kamchatka in 2007–2011” *Atmospheric and Oceanic Optics*, 25:3, 228–235 (2012).

[6] Zuev V. V., *Lidar monitoring of the stratosphere*, Nauka, Novosibirsk, 307(2004).

[7] Deminov M. G., “Earth’s ionosphere” in: *Plasma heliogeophysics Vol.2*, Ed. Zelenyi L. M. and Veselovskii I. S., Fizmatlit, Moscow, 559(2008).