

УДК 551.508

Лидарные исследования резонансного рассеяния атмосферы на возбужденных ионах атомарного кислорода и азота

В.В. Бычков¹, И.Н. Середкин¹, А.С. Пережогин¹,
Б.М. Шевцов¹, В.Н. Маричев^{2*}

¹ *Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034, Камчатский край, Елизовский р-н, с. Паратунка, ул. Мирная, 7*

² *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 9.09.2016 г.

Представлены результаты лидарного зондирования верхней и средней атмосферы на длинах волн 561 и 532 нм. Первая, с учетом ширины полосы излучения лазера, включает частоту, соответствующую резонансному переходу между возбужденными состояниями иона атомарного кислорода; вторая охватывает три возможных перехода между возбужденными состояниями ионов атомарного азота. Обсуждается возможность использования лидарного метода в исследованиях ионосферы. Физической основой этого метода может быть резонансное рассеяние на возбужденных ионах верхней атмосферы.

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

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 области высот 150–300 км может коррелировать с содержанием плазмы в области максимума ночного слоя F_2 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, появляющихся во время высыпаний сверхтепловых электронов в ионосферу.

Содержание ионов атома азота на ионосферных высотах составляет единицы процентов днем и пренебрежимо мало ночью. В работах [1, 3] приведена схема дипольных переходов для возбужденных состояний иона атомарного азота, объясняющая наблюдавшиеся корреляции лидарного сигнала на длине волны 532 нм с содержанием плазмы на ионосферных высотах.

В настоящей работе представлены результаты одновременной регистрации резонансного рассеяния

на возбужденных ионах атомарного азота и атомарного кислорода, являющегося основным заряженным компонентом в слое F_2 ионосферы. В работе [2] приведена таблица со схемой дипольных переходов, способных обеспечить резонансное рассеяние на возбужденных ионах атомарного кислорода. В соответствии с ней длина волны зондирующего излучения 561 нм выбрана как наиболее подходящая к имеющемуся оборудованию.

Оборудование

В лидарных наблюдениях 2015–2016 гг. использовался двухчастотный лидар с лазером Brilliant-B для генерации излучения на длине волны 532 нм и лазером на красителях TDL-90 с лазером накачки YG982E для генерации излучения на длине волны 561 нм. Все три лазера имеют частоту 10 Гц. Энергия импульса на длине волны 532 нм составляла ~400 мДж и около 150 мДж на длине волны 561 нм. Схема возможного дипольного перехода, попадающего в полосу лазера TDL-90 на длине волны 561 нм, приведена в таблице.

Приемный телескоп лидара имеет параболическое зеркало диаметром 60 см. Угол зрения приемника составляет от 0,1 до 1 мрад. Через линзу приемного блока принятый телескопом сигнал в виде параллельного пучка подается в световод. В световоде установлена спектроделительная пластина под углом 45° к направлению распространения пучка.

* Василий Валентинович Бычков (vasily.v.bychkov@gmail.com); Илья Николаевич Середкин (seredkin@ikig.ru); Андрей Сергеевич Пережогин (d72156@gmail.com); Борис Михайлович Шевцов (bshev@ikig.ru); Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru).

Дипольные переходы возбужденных ионов атома кислорода, попадающие в полосу излучения лазера TDL-90

Компонент	Длина волны в вакууме, нм	A_{ki} (c^{-1})	Нижний уровень	Терм	J	Верхний уровень	Терм	J
ОП	561,1072	$2,14e + 06$	$2s^2 2p^2(^1S)3s$	2S	1/2	$2s^2 2p^2(^3P)4p$	$^2P^o$	1/2

Примечание. ОП – однократно ионизованный ион O^+ ; J – квантовое число полного момента импульса; A_{ki} – элементы матрицы вероятности переходов.

Излучение с длиной волны больше 532 нм пластиной пропускается, излучение с длиной волны 532 нм и меньше отражается под углом 90° в другой световод. Разделенные потоки излучения направляются далее на фотокатоды двух ФЭУ Hamamatsu H8259–01, подключенных к счетчикам фотонов Hamamatsu M8784, длительность строба которых равна 10 мкс.

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 в августе 2015 г.

Результаты зондирования

Как отмечалось в работах [1, 3], для наблюдения резонансного рассеяния на длине волны 532 нм от слоев верхней атмосферы, кроме условий хорошей погоды, требуется появление дополнительных источников ионизации в ночных условиях. В 2008–2015 гг. хорошо выраженный сигнал от слоев верхней атмосферы удавалось наблюдать от 2 до 5 раз в году, при общем числе дней, пригодных по погодным условиям, около 50–60. По наблюдениям 2008–2015 гг. были выявлены особенности поведения сигналов резонансного рассеяния на длине волны 532 нм, к которым относятся корреляция суммарных сигналов от разных слоев между собой, что не характерно для верхней атмосферы, а также корреляция сигнала с f_oF_2 и (или) f_oE_s .

За период с ноября 2015 по ноябрь 2016 г. было проведено 75 сеансов зондирования атмосферы. Сигнал резонансного рассеяния с высот верхней атмосферы на длине волны 561 нм с характерными особенностями поведения, выявленными для рассеяния на длине волны 532 нм, наблюдался в 20 случаях. Все выраженные явления резонансного рассеяния зарегистрированы только в ноябре 2015 г. (семь из восьми дней наблюдений), декабре 2015 г. (один из трех), апреле 2016 г. (семь из девяти) и мае 2016 г. (пять из пяти).

Одновременные измерения по второму каналу (532 нм) начаты с января 2016 г. Сигнал резонансного рассеяния по длине волны 532 нм обнаружен только в четырех случаях, по два в апреле и мае 2016 г.

Примеры результатов зондирования для примерной системы регистрации на длине волны 561 нм приведены на рис. 1 и 2. Кривые на рис. 1, а – это сигнал – фон, накопленный за 15 мин по 9000 по-

сылок импульсов лазера. Такой интервал накопления обусловлен режимом работы ионосферной станции, управляющий компьютер которой синхронизован по GPS с компьютером лидара. Фоновый сигнал во все время наблюдений был стабилен и составлял 9–10 импульсов на строб за 15 мин.

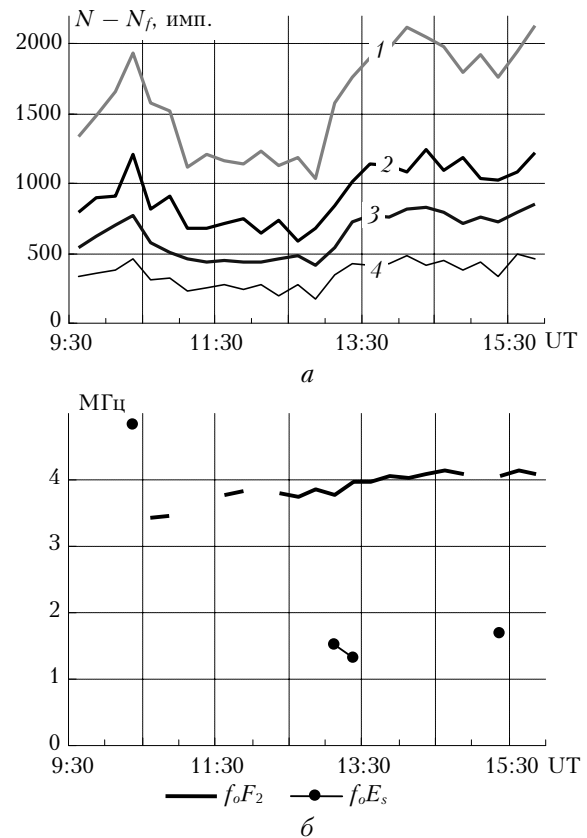


Рис. 1. Суммированный по слоям 100–200 (1), 200–300 (2), 300–400 (3) и 500–600 км (4) сигнал – фон (а); критические частоты слоев F_2 и E_s (б) 9 декабря 2015 г.

Рис. 1 показывает высокую корреляцию суммарных сигналов от 100-километровых слоев между собой. Коэффициент корреляции между суммированными по слоям сигналами на рис. 1, а превышает 0,9; синхронный рост лидарного сигнала отмечается во всей области высот 100–600 км в 10:15 UT и после 12:45 UT.

Геоманнитная обстановка 9 декабря 2015 г. оставалась спокойной все время наблюдений. Согласно ионосферным данным, для ночного слоя F_2 была характерна высокая диффузность (F -рассеяние), и в большой части случаев определить точное значение f_oF_2 не представлялось возможным. Диффузность слоя F_2 объясняется наличием в слое неодно-

родностей, причиной которых могут быть, в числе других, и высыпания электронов. Неоднородности могут также вызываться проникновением внутренних гравитационных волн на высоты ионосферы. Наблюдающееся в таких ситуациях свечение ночного неба свидетельствует о возникновении в ионосфере возбужденных состояний ионов кислорода, гидроксила и других атомов и молекул.

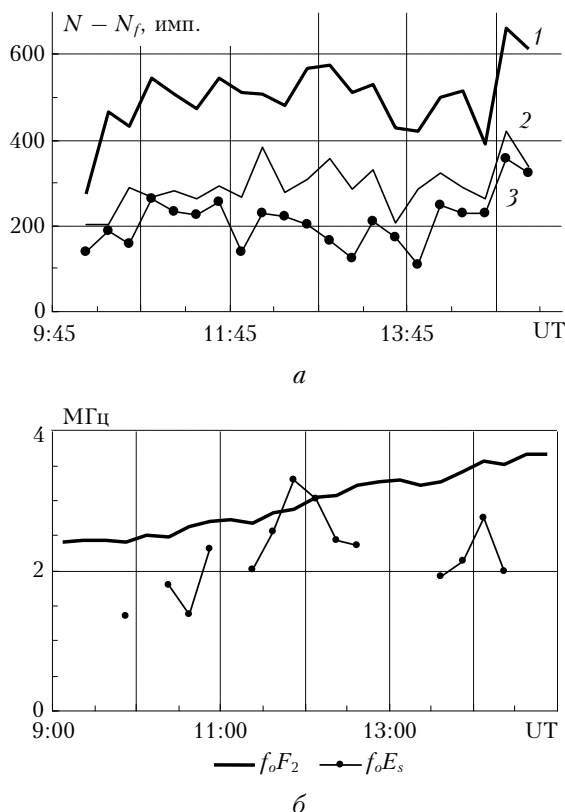


Рис. 2. Лидарный сигнал по слоям 100–200 (1), 200–300 (2), 300–400 км (3) (а); критические частоты слоев F_2 и E_s (б) во время лидарных наблюдений 26 ноября 2015 г.

В целом 9 декабря 2015 г. происходил рост f_oF_2 в ночных условиях, что подтверждает появление дополнительных источников ионизации. Ночные E_s появлялись на ионограммах в 10:15 UT, а также с 12:30 до 15:15 UT (см. рис. 1, б), что соответствует росту лидарного сигнала в указанное время.

Корпускулярный тип сигнала уверенно выражен только в 13:15 UT, но в связи с малой интенсивностью всех E_s можно предполагать такой же тип у остальных слоев. Начала и концы следов, по которым определяется тип слоя, имеют меньшую интенсивность, чем сам след, и чувствительности приемника ионозонда не всегда достаточно для их регистрации. В промежутке 12:30–16:00 UT E_s появлялись на всех ионограммах. По правилам обработки ионограмм на рис. 1, б отображены только E_s с хорошо выраженным следом.

Лидарный сигнал на длине волны 532 нм наблюдался 9 декабря 2015 г., достигая 100–180 импульсов за 15 мин наблюдений. Корреляции для

сигналов, суммированных по 100-километровым слоям, на этой длине волны заметны на отдельных интервалах времени. Для всего ряда данных коэффициент корреляции составил 0,55 в области 100–300 км и 0,35 для области 200–400 км.

На рис. 2 представлены результаты наблюдений за 26 ноября 2015 г. Коэффициент корреляции для сигналов от 100-километровых слоев для области 100–300 км составляет 0,78 и 0,57 для области 200–400 км. Сигнал от области 500–600 км мал и не приводится.

В отличие от относительно плавного хода кривых на рис. 1, ход суммарного сигнала на рис. 2 переменчивый. Значения лидарного сигнала существенно (в 4–5 раз) меньше, чем у сигнала, наблюдавшегося 9 декабря 2015 г. По данным ионозонда, диффузность слоя F_2 была выражена слабо. Слой E_s появлялись в области 100–150 км. Выраженный корпускулярный характер слоев однозначно не подтвержден, но наблюдались вариации высоты E_s и его диффузность. Можно отметить рост f_oF_2 в ночных условиях в течение всего времени лидарных наблюдений. Геомагнитная обстановка была спокойной. По данным геомагнитной обсерватории «Паратунка», суммарный трехчасовой K -индекс равнялся 0 во время наблюдений и 3 за все сутки.

Пример результатов зондирования для приемной системы регистрации на длинах волн 561 и 532 нм приведен на рис. 3.

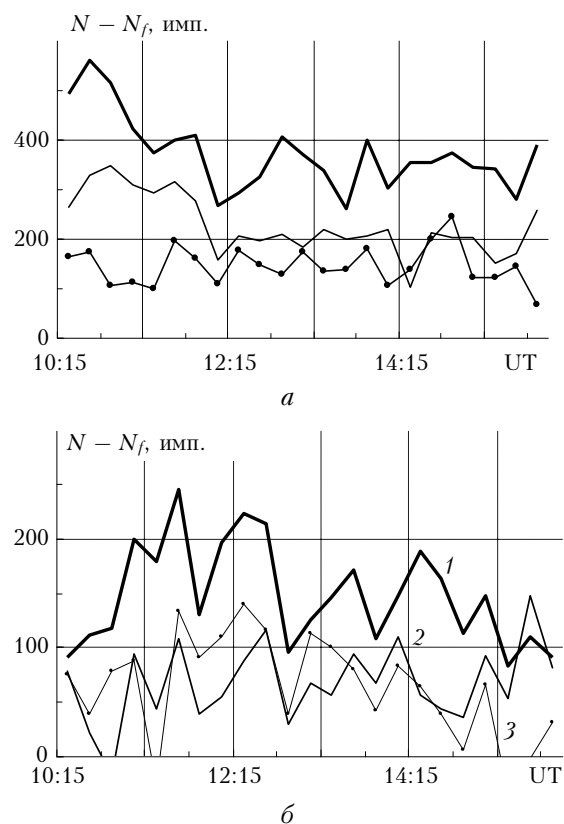


Рис. 3. Суммированный по слоям 100–200 (1), 200–300 (2), 300–400 км (3) лидарный сигнал – фон для длин волн 561 (а) и 532 нм (б) по данным наблюдений 13 апреля 2016 г.

Высокая корреляция ($K = 0,71$) между суммарными сигналами от 100-километровых слоев между собой по всему ряду данных наблюдается только для слоев 100–200 и 200–300 км на длине волны 561 нм. Для рядов данных, суммированных по областям 200–300 и 300–400 км, на рис. 3, *a* и всех рядов на рис. 3, *б* корреляция визуально наблюдаются, но в отдельных точках возникают антикорреляции, и общий коэффициент корреляции мал.

Согласно данным геомагнитной обсерватории «Паратунка», 13 апреля 2016 г. в ионосфере наблюдалось умеренное возмущение, начавшееся 12 апреля в ~12:00 UT. Во время наблюдений значения геомагнитных индексов равнялись 4 3 4 4 3 3 3 2. (Полужирным выделены значения индексов, зарегистрированные непосредственно во время лидарных измерений.) В соответствии с ионосферными данными, для ночного слоя F_2 была характерна высокая диффузность (F -рассеяние). Рост f_oF_2 после 12:00 UT не отмечается, как и его уменьшение, что не характерно для ранних ночных значений этого параметра.

Ночные E_s появлялись на ионограммах в 10:15–10:45 UT в области 100–150 км, а также с 14:00 UT и 15:45 UT в области 150–200 км. Тип всех слоев хорошо выражен и может быть определен как корпускулярный.

Обсуждение результатов

На рис. 4, *a* представлен суммарный за ночь 9 декабря 2015 г. сигнал S (кривая 1) за вычетом измеренного фона. Тот же сигнал – фон, нормированный на величину $(H/100)^2$, представлен кривой 3, где H – высота в километрах. Нормировка выбрана из тех соображений, что телесный угол, под которым видно зеркало телескопа с больших высот, уменьшается как $\sim 1/H^2$, а уменьшение интенсивности потока лазерного излучения с высотой компенсируется увеличением засвеченного объема. Простое применение такой нормировки дает почти линейно возрастающий до высоты 400–450 км профиль сигнала (кривая 2). 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 единицы миллисекунд.

Процессы последействия описаны в работе [4]. Они могут быть сгруппированы по характеру и времени действия относительно основного импульса. Характерные времена процессов находятся в интервале от десятков наносекунд до миллисекунд и даже секунд. Как правило, результаты экспериментов по их исследованию представляются экспонентой или суммой экспонент.

В работе [5] предложена методика коррекции исходного сигнала путем выделения в нем экспоненты в области 90–150 км методом наименьших квадратов (НК) и вычитания ее из исходного сигнала. Показано, что этот способ позволяет учесть импульсы последействия и восстановить профиль

отношения рассеяния в области $\sim(60–80$ км). Для успешного применения этого метода необходимо иметь хорошо накопленный сигнал. При малых средних значениях исходных данных метод НК работает плохо в связи с появлением отрицательных величин в подкоренном выражении. По этой причине 15-минутные данные, использованные при построении рис. 1, на последействие не корректировались.

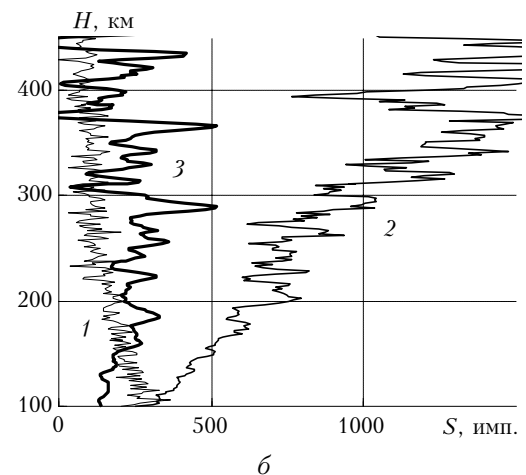
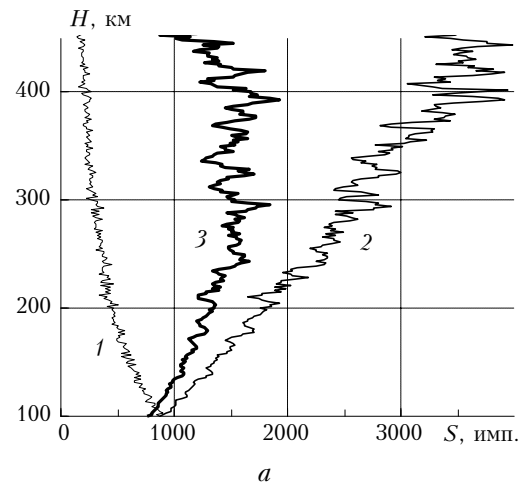


Рис. 4. Суммарный лидарный сигнал S (1) и нормированный лидарный сигнал S_n (2, 3) по результатам наблюдений 9 декабря 2015 г. (а) и 13 апреля 2016 г. (б)

Поскольку сигналы молекулярного и аэрозольного рассеяния с высот больше 100 км отсутствуют, можно попытаться выделить затухающий сигнал последействия в виде экспоненты. На нескольких наборах данных за разные дни проверено, что метод коррекции на последействие путем выделения в исходных данных экспоненты в области верхней атмосферы не работает.

Если последействие от засветки на высоте 15–20 км проявляется на высотах 100–600 км, то его характерные время и высота составляют миллисекунды и сотни километров. Тогда в качестве первого приближения для учета последействия можно использовать константу, что эквивалентно некоторому увеличению значения измеренного фонового

сигнала. Величина этой константы может быть примерно оценена из предположения, что в условиях ионосферы общая интенсивность резонансного рассеяния на возбужденных ионах атома кислорода пропорциональна общей концентрации этих ионов, а начиная с высот ~200 км и электронов. Отношение среднего лидарного сигнала по слою 500–600 км к сигналу в районе максимума слоя F_2 должно примерно равняться отношению средних концентраций электронов в этих областях.

Концентрация электронов в ионосфере рассчитывалась по модели IRI для условий лидарных наблюдений. Полученный профиль показан на рис. 4 кривой 3. Величина импульсов последействия составила ~4 на каждый строб данных. Значение константы подбиралось таким образом, чтобы средний суммарный сигнал от области 500–600 км составлял ~0,3 от среднего лидарного сигнала в области 250–450 км. Максимум ночного слоя F_2 был расположен вблизи высоты 350 км. Данные кривых 2, 3 на рис. 3, а сглажены методом скользящего среднего с окном 4,5 км.

Для сравнения на рис. 4, б представлен такой же профиль для результатов наблюдений 13 апреля 2016 г. Данные сглажены с окном 7,5 км. Значение константы корректировки на последействие равно 1,4 импульса на строб. Нужно отметить, что сигналы, подобные сигналу от 9 декабря 2015 г., наблюдались редко. Например, 6 сентября 2008 г. при зондировании на длине волны 532 нм и рассеянии на ионах атомарного азота [6]. Основная часть зарегистрированных сигналов резонансного рассеяния представлена данными, показанными на рис. 2, 3. Выяснение причины отличий требует отдельных дополнительных исследований. Учет импульсов последействия в исходных данных, использованных при построении рис. 1, а и 3, а, должен приводить к параллельному сдвигу всех графиков вниз на ~300 и ~100 ед. соответственно. Общая картина при этом не меняется.

Кривая 2 на рис. 4 – это фактически кривая среднего содержания возбужденного состояния иона кислорода $2s^22p^2(^1S)3s$ и $2s^22p^2(^3P)3s$, время жизни которого составляет доли микросекунды. Профиль состоит из 213200 измеренных значений и содержит историю функции ионизации за 6,5 ч наблюдений. По положению локальных максимумов в ходе профиля сигнала можно оценивать характерную энергию и спектр высывавшихся электронов.

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. Во время высыпаний электронов в ионосферу на высотах 100–300 км значения лидарного сигнала обратного рассеяния на длине волны 561 нм в 2–4 раза превосходят значения лидарного сигнала на длине волны 532 нм от рассеяния на ионах атомарного азота, что соответствует сделанным ранее оценкам [1, 2].

2. Явление последействия играет важную роль в поведении лидарного сигнала с высот верхней атмосферы. В первом приближении последействие можно считать постоянным и величина его может оцениваться по модельным представлениям о содержании соответствующих ионов в ионосфере. Этот вопрос требует уточнения и дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

3. Лидарные наблюдения верхней атмосферы могут дать информацию о динамике и спектрах высывавшихся электронов с энергиями 0,1–10 кэВ в ионосферу с хорошим разрешением по пространству.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ДВО РАН № 12-I-ОФН-16, гранта РФФИ № 16–05–00901а.

1. Bychkov V.V., Nepomnyashchii Y.A., Perezhogin A.S., Shevtsov B.M. Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka and possible causes of their generation // J. Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 4. P. 303–307. DOI: 10.1134/S1024856015040041.
2. Bychkov V.V., Nepomnyashchii Y.A., Perezhogin A.S., Shevtsov B.M. Resonance scattering at excited atoms and ions of the upper atmosphere as a possible mechanism for ionosphere investigations // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.220596.
3. Bychkov V.V., Nepomnyashchii Y.A., Perezhogin A.S., Shevtsov B.M. Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka for 2008 to 2014 observations // Earth, Planets Space. 2014. V. 66. P. 150.
4. Зуев В.В. Лидарный контроль стратосферы. Новосибирск: Наука, 2004. 307 с.
5. Бычков В.В., Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Маричев В.Н., Новиков П.В., Черемусин А.А. Учет импульсов последействия ФЭУ в лидарных сигналах средней атмосферы Камчатки // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 2. С. 107–111.
6. Bychkov V.V., Nepomnyashchii Yu.A., Perezhogin A.S., Shevtsov B.M., Polekh N.M. Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka according to observations in 2008 // J. Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 297–302.

V.V. Bychkov, I.N. Seregin, A.S. Perezhogin, B.M. Shevtsov, V.N. Marichev. Lidar investigations of the resonance scattering of the atmosphere on excited ions of atomic nitrogen and oxygen.

The results of two-frequency lidar investigation at wavelengths of 561 and 532 nm of the atmosphere scattering are presented. The laser radiation band covers two emission lines of atomic oxygen and three emission lines of atomic nitrogen. The lines correspond to the transitions between the excited states of ions of atomic oxygen or nitrogen. The possibility of application of the lidar method for ionosphere investigations is discussed. The physical basis of this method may be the resonance scattering on upper atmosphere ions.