

УДК 551.51

Научная статья

Оптические характеристики термосферы и мезосферы

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

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

E-mail: bshev@ikir.ru

Используя лидарные сигналы на длинах волн 561 и 532 нм в диапазоне высот 30-400 км, путем решения обратной задачи восстанавливаем коэффициенты рассеяния света, соответствующие этим длинам волн, что позволяет сравнить оптические характеристики термосферы, мезосферы и верхней стратосферы и определить соотношения между резонансным, рэлеевским и аэрозольным рассеянием света на разных высотах атмосферы. Используя коэффициенты рассеяния в термосфере, находим сечения рассеяния света на длинах волн 561 и 532 нм переходов возбужденных атомарных ионов кислорода и азота и объясняем, почему коэффициенты рассеяния для O^+ , 561 нм меньше чем для N^+ , 532 нм, в то время как концентрация O^+ на два порядка выше чем N^+ . Полученные здесь результаты представляют интерес для понимания ионизационного эффекта солнечной активности на оптические характеристики атмосферы, которые определяют погодные и климатические изменения.

Ключевые слова: оптика атмосферы, резонансный лидар, лазерный ионозонд, лидарные отражения в термосфере, коэффициент и сечение рассеяния света, ионизация, аэрозоль, солнечная активность, ионная аэрономия.

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-191-208

Поступила в редакцию: 01.12.2022

В окончательном варианте: 12.12.2022

Для цитирования. Шевцов Б. М., Пережогин А. С., Середкин И. Н. Оптические характеристики термосферы и мезосферы // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2022. Т. 41. № 4. С. 191-208.  DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-191-208

Контент публикуется на условиях лицензии *Creative Commons Attribution 4.0 International* (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Шевцов Б. М., Пережогин А. С., Середкин И. Н., 2022

Финансирование. Работа выполнялась в рамках государственного задания по теме «Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях» (No АААА-А21-121011290003-0).

Введение

Исследования термосферы связаны с проблемами солнечной активности, космической погоды, аэронавигации, климата, ионизации, коммуникаций, охраны окружающей среды, живых систем и многого другого. Состояние термосферы зависит от взаимодействия ее газовых компонентов с солнечным излучением и потоками заряженных частиц. Взаимодействия термосферы с солнечным излучением можно изучать с помощью лидарных систем, частотная избирательность которых является существенным дополнением к возможностям ионозондов. Многочастотный термосферный лидар имитирует различные диапазоны оптического спектра и получает отклики от всех слоев атмосферы. Этот подход наиболее адекватный в аэронавигации. Такие системы давно обсуждались [1, 2, 3, 4], но появились они лишь в последнее время [5, 6, 7, 8].

Лидарные исследования термосферы начинались с предложений создания N_2^+ [1] и He [2] лидаров. Однако лидарные отражения в термосфере были получены сначала на N^+ [10,11], а затем на O^+ [12], для проверки этих результатов были исследованы корреляции лидарных сигналов с данными ионозондов. Некоторые особенности таких корреляций будут обсуждаться в этой статье.

Совсем недавно были получены лидарные отражения в термосфере от возбужденных переходов атомарного гелия [8]. Это позволило сравнить два различных подхода в лидарных исследованиях термосферы. В проекте [8] используются узкополосный инфракрасный лазер, нейтральные компоненты термосферы и инфракрасный детектор, а в проекте [5, 6, 7] используются широкополосный лазер видимого частотного диапазона, ионы и детекторы видимого излучения. Внедрение технологий инфракрасного лидара потребовало больше времени. В [8] рассматриваются изменения в термосфере в зависимости от изменений зенитного угла солнца, а в [5, 6, 7] — в зависимости от изменения степени ионизации. При значительных технологических и методологических различиях можно отметить сопоставимость лидарных сигналов, полученных в двух проектах. Можно также отметить, что эти два альтернативных лидарных подхода хорошо дополняют друг друга, поскольку позволяют проводить аэронавигационные наблюдения в различных частотных диапазонах оптического излучения с нейтральными и заряженными компонентами термосферы. И что самое главное, оба проекта позволяют работать на различных высотах до тысячи километров. В этой статье будут рассмотрены некоторые корреляции лидарных сигналов термосферы и мезосферы.

Однако большие высоты зондирования и слабое светорассеяние в термосфере создают существенные трудности для развития лидарных методов. Проблема в том, что лидарные сигналы затухают прежде всего в средних и нижних слоях атмосферы, поэтому проблему зондирования термосферы можно сравнить с проблемой обнаружения слабых оптических отражений через мутный экран. И эту проблему нельзя решить простым увеличением мощности лидара, поскольку слабый полезный сигнал трудно обнаружить после интенсивного воздействия на фотоприемник сигналом от нижних слоев атмосферы. Успешное зондирование термосферы зависит от благоприятного соотношения светорассеяния в верхних

и нижних слоях атмосферы. Благоприятные условия для лидарного зондирования термосферы будут рассмотрены на примере соотношения лидарных сигналов от термосферы и мезосферы. В дни, когда возникали неблагоприятные условия в тропосфере и стратосфере, зондирование термосферы и мезосферы не проводилось. При такой стратегии лидарных наблюдений на первый план в создании помех выходит мезосфера, аэрозольное наполнение которой имеет сезонные и солнечные циклы. Благодаря этому возникают наиболее благоприятные периоды наблюдений слабых термосферных лидарных отражений.

Солнечная активность влияет одновременно на ионизацию термосферы и мезосферы, причем ионы мезосферы становятся центрами конденсации водяных паров и образования водяного аэрозоля, и в комплексе эти факторы могут влиять на формирование термосферных лидарных отражений. Это наиболее вероятный механизм зависимости термосферных лидарных сигналов от солнечной активности. Очевидно, что этот же механизм ионизации лежит также в основе аэрономии верхних слоев атмосферы, в связи с чем весьма важно продолжать лидарные наблюдения в термосфере в целях понимания механизмов влияния солнечной активности на погодные и климатические изменения.

Особенности отражений в термосфере обусловлены их резонансной природой. А слабость сигналов есть следствие низкой концентрации рассеивателей. В связи с этим необходимо выбрать наиболее эффективные атомные переходы для светорассеяния и определения оптических характеристик термосферы, соответствующих этим переходам. Ниже будут обсуждаться лидарные сигналы двухчастотного зондирования термосферы, сечения рассеяния и коэффициенты рассеяния переходов между возбужденными состояниями атомарных ионов кислорода и азота. Относительная эффективность светорассеяния на различных компонентах термосферы будет определяться сравнением результатов двухчастотного лидарного зондирования.

Чрезвычайно слабые лидарные отражения в термосфере, которые коррелируют с данными ионозондов, были обнаружены в 2008 и 2017 годах над Камчаткой в сезоны низкого аэрозольного наполнения атмосферы при минимумах солнечной активности. Здесь эти отражения рассматриваются в сравнении с мезосферными и стратосферными лидарными сигналами, что позволяет определить благоприятные условия для термосферных лидарных наблюдений. В 2014 году было показано, что линии переходов между возбужденными состояниями атомарных ионов азота попадают в полосу излучения лидарного сигнала с длиной волны 532 нм, а в 2017 году одновременно были получены лидарные отражения в термосфере на длинах волн 561 и 532 нм возбужденных переходов атомарных ионов кислорода и азота, чем резонансная природа термосферных лидарных отражений была подтверждена.

Здесь мы, используя лидарные сигналы на длинах волн 561 и 532 нм в диапазоне высот 30-400 км, путем решения обратной задачи восстанавливаем коэффициенты рассеяния света, соответствующие этим длинам волн, что позволяет сравнить оптические характеристики термосферы, мезосферы и верхней стратосферы

и определить соотношения между резонансным, рэлеевским и аэрозольным рассеянием света на разных высотах атмосферы.

В заключение, используя коэффициенты рассеяния в термосфере, мы находим сечения рассеяния света на длинах волн 561 и 532 нм переходов возбужденных атомарных ионов кислорода и азота и объясняем, почему коэффициенты рассеяния для O^+ , 561 нм меньше чем для N^+ , 532 нм, в то время как концентрация O^+ на два порядка выше чем N^+ . Полученные здесь результаты представляют интерес для понимания ионизационного эффекта солнечной активности на оптические характеристики атмосферы, которые определяют погодные и климатические изменения.

Атомарный кислород преобладает в термосфере, поэтому он дает наибольший вклад в ионизацию. С учетом этого, определить концентрацию ионов кислорода в термосфере можно по данным ионозонда, что дает возможность для верификации и калибровки лидарных данных.

Методы и оборудование

Аэрономические исследования верхних слоев атмосферы требуют разработки дистанционных методов. Лидарные технологии для изучения термосферы обсуждались с разных точек зрения [1, 2]. Резонансные лидары были предложены для определения температуры, скорости и концентрации метастабильного He^{1083} и N_2^+ в термосфере [3, 4]. Здесь мы рассматриваем альтернативное решение для термосферного лидара с использованием широкополосного лазера. По сути, это лидар Рэля, который используется в термосфере как резонансный. Удивительно, но такое простое решение оказалось успешным. Это было обнаружено в результате анализа лидарных наблюдений [5], а затем подтверждено в [6, 7]. Преимуществом широкополосного лидара является простота технологического решения и универсальность использования на всех высотах зондирования и для различных типов рассеивателей.

В [7] лидарные сигналы на длинах волн 561 и 532 нм рассматривались в диапазоне высот 100-400 км. Здесь мы рассмотрим лидарные сигналы в диапазоне высот 30-400 км. Это позволит сравнивать интенсивность рассеяния света на разных высотах. Используя лидарные сигналы, мы определим коэффициенты рассеяния для двух длин волн. Это позволит найти сечения резонансного рассеяния света на возбужденных ионах атомарного кислорода и азота в термосфере. От соотношения этих величин зависят эффекты резонансного распространения оптического излучения.

Параметры двухчастотного рэлеевского лидара с длинами волн 532 и 561 нм представлены в табл. 1 и на рис. 1. Этот лидар использовался в [7]. Передатчик 2 имеет перестраиваемую частоту. Выбор длин волн 532 и 561 нм будет обоснован ниже. До 2017 года использовался только передатчик 1. Идея двухчастотного лидара возникла из понимания природы резонансных лидарных отражений в термосфере после работы [6].

Таблица 1

Оборудование [Equipment]

Передатчик 1	Передатчик 2	Приемник
Лазер Nd: YAG Brilliant-B	Жидкостный лазер TDL-90	Диаметр зеркала телескопа 60 см
Длина волны 532.08 нм	Лазер накачки YG-982E	ФЭУ Hamamatsu H8259-01
Энергия импульса 400 мДж	Длина волны 561.106 нм	Счетчик фотонов M8784-01
Спектральная ширина импульса 0.040 нм	Энергия импульса 100 мДж	Пространственное разрешение 1.5 км
Длительность импульса 5 нс	Спектральная ширина импульса 0.025 нм	Спектральная ширина светофильтров 1 нм
Расходимость пучка 0.5 мрад	Длительность импульса 10 нс	
	Расходимость пучка 0.5 мрад	

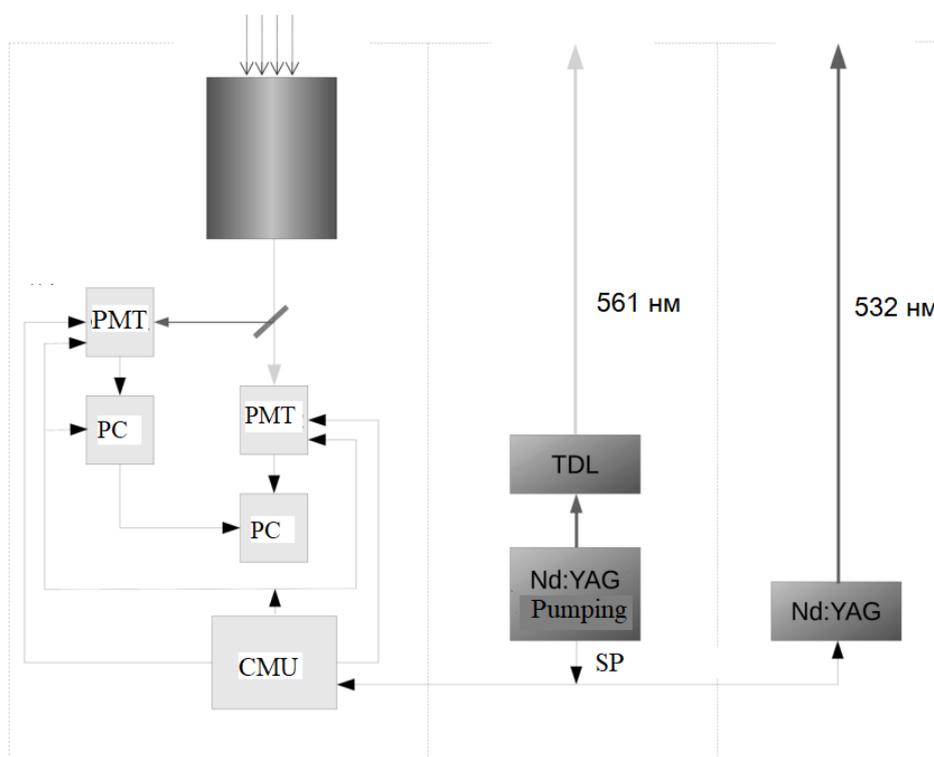


Рис. 1. Оптическая схема лидара, где SP — синхроимпульс, PC — счетчик фотонов, PMT — ФЭУ, CMU — блок управления.

[Figure 1. Optical scheme of the lidar. Here, SP — synchro pulse, PC — photon counters, PMT — photomultiplier tubes, CMU — control and monitoring unit]

Переходы между возбужденными состояниями ионов атомов кислорода и азота, полученные из базы данных NIST Atomic Spectra Database [9], представлены в

табл. 2. Переход иона азота попал в полосу лазерного спектра с длиной волны 532 нм случайно [5, 6], но передатчик 2 был специально настроен на переход иона кислорода [7].

Таблица 2

Переходы возбужденных ионов атомов кислорода и азота, попадающие в полосы излучения лазеров (II — однократно ионизированный атом) [9]
[Transitions of excited ions of oxygen and nitrogen atoms falling into the emission bands of lasers (II — once-ionized atom) [9]]

	Компонент	Длина волны Воздух (нм)	A_{ki} (s^{-1})	Нижний уровень	Терм J	Верхний уровень	Терм J
1	OII	561.1072	2.14e+06	$2s^2 2p^2(^1S)3s$	2S $1/2$	$2s^2 2p^2(^3P)4p$	$^2P^o$ $1/2$
2	NII	532.0958	2.52e+07	$2s2p^2(^4P)3p$	$^5P^o$ 1	$2s2p^2(^4P)3d$	5P 2

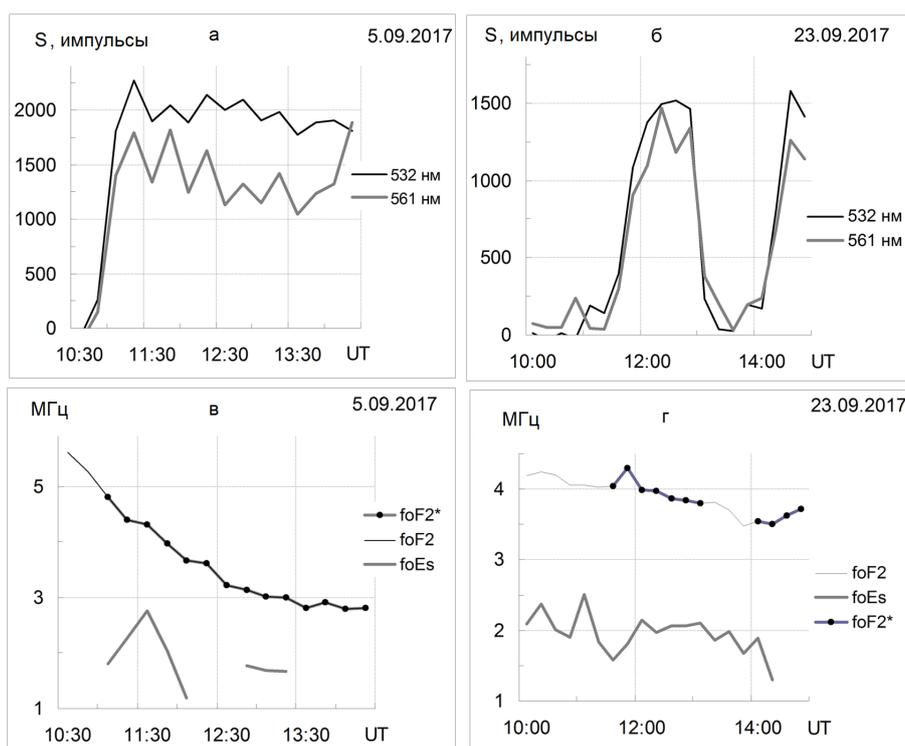


Рис. 2. Лидарные сигналы (S), отраженные от слоя 200-400 км, (а, б) и параметры ионосферы foF2 и foEs (в, г) во время лидарных наблюдений 5 и 23 сентября 2017 г. над Камчаткой.

[Figure 2. Lidar signals (S) reflected from the layer of 200-400 km (а, б), and parameters of the ionosphere foF2 and foEs (в, г) during lidar observations on September 5 and 23, 2017 over Kamchatka.]

На рис. 2 представлены двухволновые лидарные отражения в термосфере в сравнении с данными радиоионозонда [10, 11, 12].

Левая панель на рис. 2 — нормальный случай, когда лидарные сигналы коррелируют с параметрами ионосферы, а правая панель на рис. 2 — аномальный случай, когда лидарные сигналы не коррелируют с данными ионозонда. Мы видим два разных результата на левой и правой панелях рис. 2. Второй случай нуждается в пояснении.

Изменения лидарных сигналов 23 сентября 2017 г. на рис. 2(б) рассматривались в [10, 11] как индикатор высыпаний заряженных частиц в атмосферу. Однако признаков высыпаний 23 сентября 2017 г. не было, рис. 2(г). Ионизация ночной термосферы 23 сентября 2017 г. менялась обычным образом, сравните рис. 2(в и г). Это свидетельствует об отсутствии высыпаний 23 сентября 2017 г.

В качестве альтернативы высыпаниям можно предположить, что причиной изменений на рис. 2(б) являются внутренние атмосферные колебания с периодом около двух часов, влияющие на лидарные сигналы. В [12, 13] предполагалось, что сильные изменения лидарных сигналов (на два порядка, рис. 2(б)) связаны с изменением прозрачности нижележащих слоев атмосферы. Здесь мы покажем это, сравнив лидарные сигналы в термосфере и мезосфере, смотрите рис. 3, 4, правые панели.

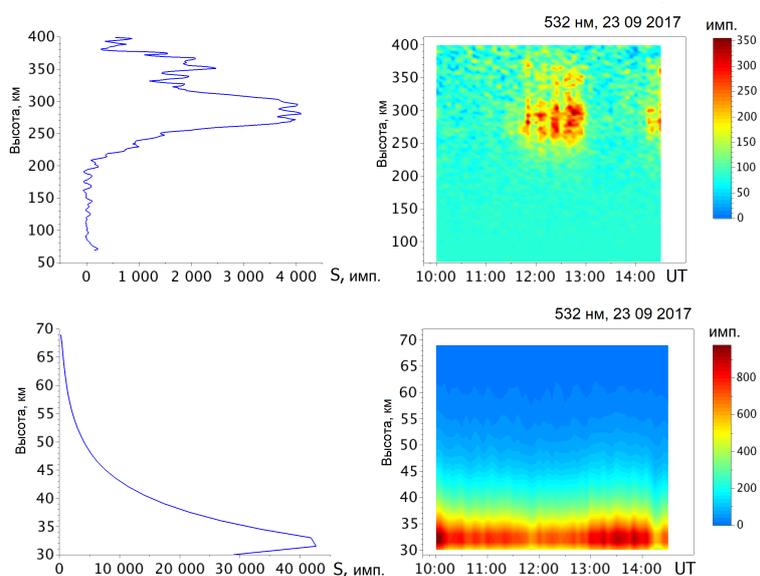


Рис. 3. Лидарные сигналы в термосфере и мезосфере: на левой панели сигнал с накоплением 4,5 часа, а на правой панели сглаженные сигналы с накоплением каждые 15 минут.

[Figure 3. Lidar signals in the thermosphere and mesosphere: on the left panel, a signal with an accumulation of 4.5 hours, and on the right panel, smoothed signals with an accumulation every 15 minutes.]

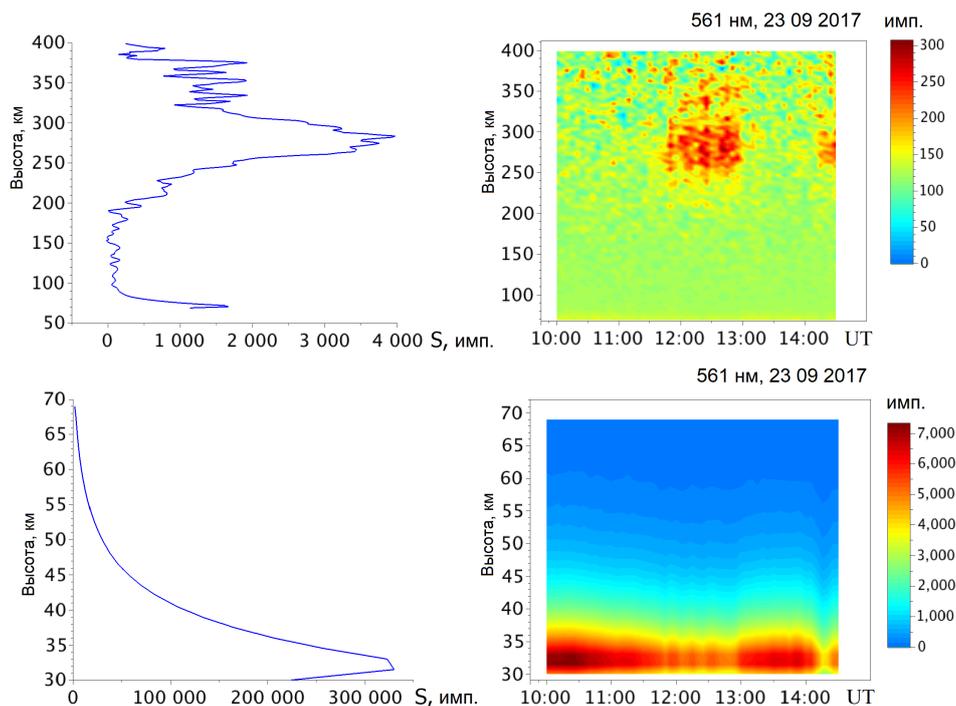


Рис. 4. Лидарные сигналы в термосфере и мезосфере: на левой панели сигнал с накоплением 4,5 часа, а на правой панели сглаженные сигналы с накоплением каждые 15 минут.

[Figure 4. Lidar signals in the thermosphere and mesosphere: on the left panel a signal with an accumulation of 4.5 hours, and on the right panel smoothed signals with an accumulation every 15 minutes.]

Результаты

Высотные профили лидарных сигналов

Рассмотрим сигналы лидара в диапазоне высот 35-400 км. Это позволит нам понять, насколько слабы термосферные отражения по сравнению с рассеянием в нижележащих слоях атмосферы, и почему эти отражения наблюдаются очень редко. По сути, мы имеем дело с проблемой обнаружения слабоотражающего объекта через мутный экран.

Отражения 23 сентября 2017 г. на длине волны 561 нм на рис. 4 повторяют особенности отражений на длине волны 532 нм на рис. 3. Мерцающие термосферные отражения возникали между 12 и 13 часами, когда сигналы рассеяния в мезосфере ослабевали. Уменьшение мезосферного рассеяния указывает на окно прозрачности в мезосфере, позволяющее наблюдать термосферные отражения. Это соответствует рис. 2(б).

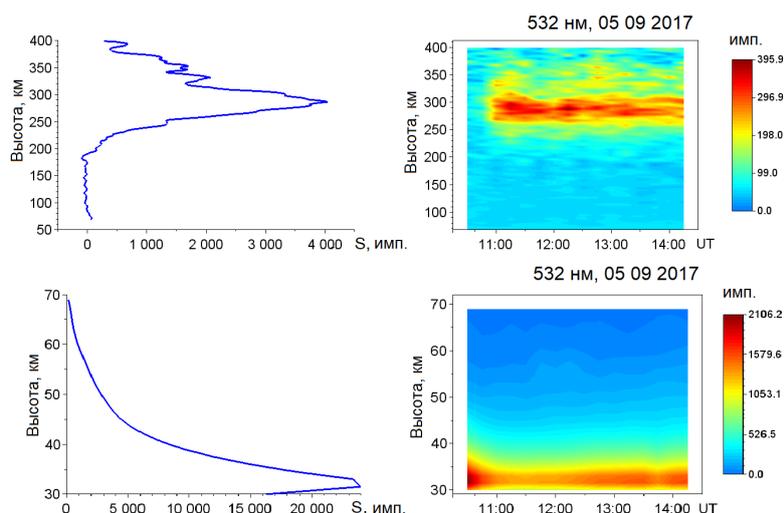


Рис. 5. Лидарные сигналы в термосфере и мезосфере: на левой панели сигнал с накоплением 4,5 часа, а на правой панели сглаженные сигналы с накоплением каждые 15 минут.

[Figure 5. Lidar signals in the thermosphere and mesosphere: on the left panel a signal with an accumulation of 4.5 hours, and on the right panel smoothed signals with an accumulation every 15 minutes.]

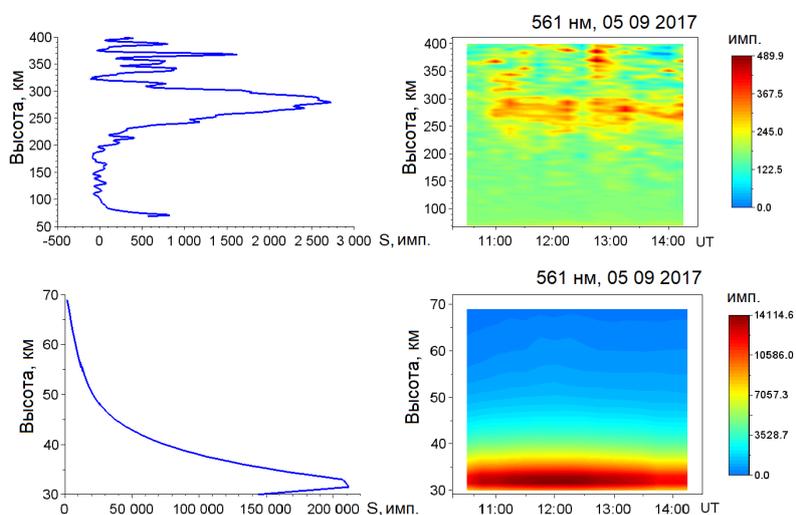


Рис. 6. Лидарные сигналы в термосфере и мезосфере: на левой панели сигнал с накоплением 4,5 часа, а на правой панели сглаженные сигналы с накоплением каждые 15 минут.

[Figure 6. Lidar signals in the thermosphere and mesosphere: on the left panel a signal with an accumulation of 4.5 hours, and on the right panel smoothed signals with an accumulation every 15 minutes.]

Другая ситуация представлена на рис. 5, 6. Термосферные отражения 05 сентября 2017 г. существовали практически весь период наблюдений, а мезосферное рассеяние мало менялось на длине волны 532 нм и не менялось на длине волны 561 нм. На левой панели рис. 2 показано, что термосферные отражения 05 сентября 2017 г. коррелируют с данными ионозонда.

Из данных, представленных на рис. 3, 4, 5, 6, можно сделать выводы. Термосферные лидарные отражения формируются ночным слоем ионов на высотах 200-400 км. Лидарный сигнал из термосферы можно принимать при повышении прозрачности нижележащего слоя атмосферы.

Лидарные отражения термосферы коррелируют с сигналом ионозонда и антикоррелируют с лидарным сигналом мезосферы.

Наиболее успешные термосферные наблюдения [5, 7] были в 2008 и 2017 годах при минимуме солнечной активности в сезоны слабого аэрозольного наполнения атмосферы, когда слабая ионизация не способствует образованию аэрозоля. Это объясняет редкость термосферных сигналов.

Коэффициенты рассеяния света

Рассмотрим коэффициенты рассеяния света в термосфере на длинах волн 561 и 532 нм по лидарным сигналам, представленным на левой панели рис. 3, 4, 5, 6.

Сшивка сигналов в диапазоне высот 30-400 км показана на рис. 7(а). Раньше это было сделано на волне 532 нм до высоты 150 км [5], что стало началом лидарных наблюдений в термосфере.

Постоянные значения лидарных сигналов на рис. 7(а) показывают уровни фона, которые представляют собой сумму темнового тока фотоприемника и свечения ночного неба. Вычитание фона из лидарного сигнала дает сигнал рассеяния.

Уровень фона на длине волны 561 нм больше, чем на длине волны 532 нм в обоих наблюдениях. Это можно в обоих случаях объяснить свойствами фотоприемника. Шум ФЭУ увеличивается с увеличением длины волны. Одновременные вариации свечения ночного неба и лидарного сигнала в одном и том же спектральном диапазоне могут свидетельствовать о высыпании заряженных частиц, но таких корреляций не наблюдалось. При минимуме солнечной активности высыпания и соответствующая им дополнительная ионизация F-слоя атмосферы маловероятны.

Высотные профили коэффициентов рассеяния $\rho(H)$ были получены решением лидарного уравнения $I(H) = (A/H^2)\rho(H)\exp(-2\int_h^H \rho(x)dx)$, учитывающего однократное рассеяние.

С помощью логарифмирования и дифференцирования это интегральное уравнение сводится к однородному уравнению Риккати (уравнению Бернулли), аналитическое решение которого имеет вид $\rho(H) = (\tilde{I}(H)/\tilde{I}(h))/(1/\rho(h) - 2\int_h^H (\tilde{I}(x)/\tilde{I}(h))dx)$, где $\tilde{I}(H) = I(H)H^2$ (модифицированный сигнал рассеяния).

Безразмерная длина рассеяния рассчитывается как $l = \int_h^H \rho(x)dx$, а прозрачность атмосферы равна $\Gamma = \exp(-\int_h^H \rho(x)dx)$. Симметрия рис. 7(д и е) является

следствием $l \ll 1$. Этот критерий прозрачности атмосферы — необходимое условие термосферных лидарных наблюдений.

Мы видим, что коэффициент рассеяния нелинейно и интегрально зависит от сигнала рассеяния. Коэффициент рассеяния $\rho(H) = \sigma \cdot n(H)$, где σ – сечение рассеяния и $n(H)$ – плотность рассеивателей. Если сечения рассеяния σ известны, то коэффициенты рассеяния на рис. 7(г) дают плотности рассеивателей N^+ и O^+ в термосфера.

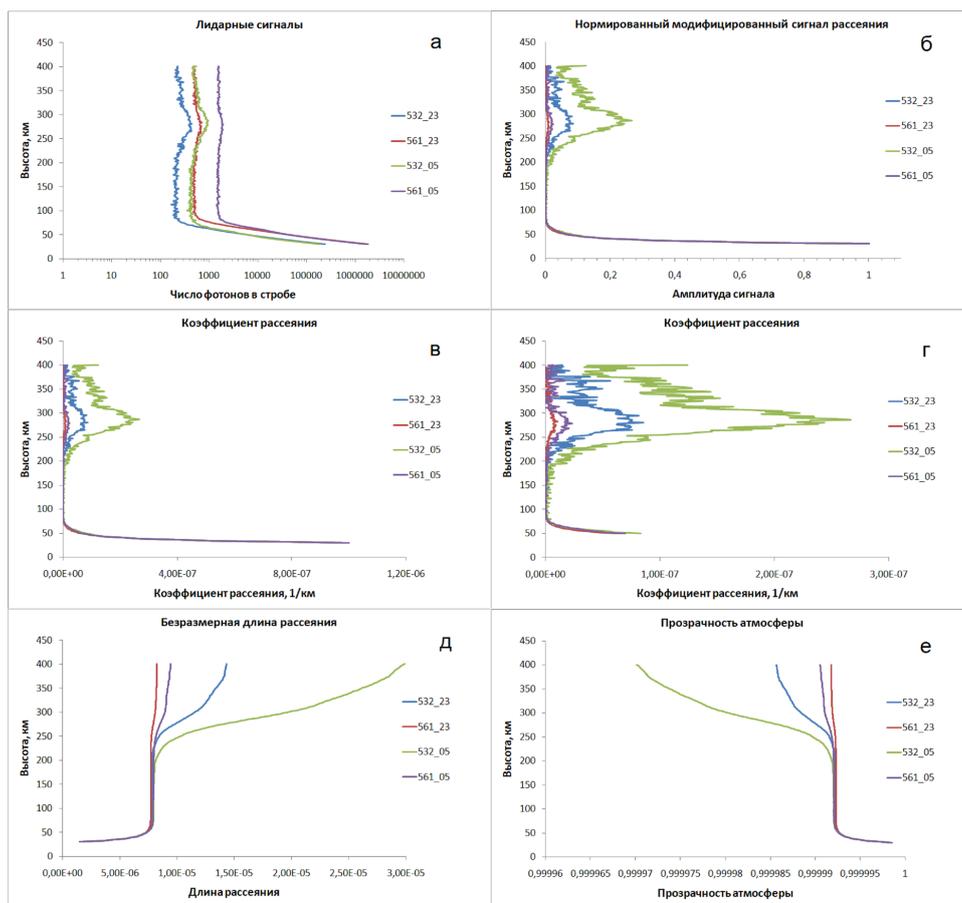


Рис. 7. Лидарные сигналы (а), нормированные модифицированные сигналы рассеяния (б), коэффициенты рассеяния (в), коэффициенты рассеяния в деталях (г), безразмерная длина рассеяния (д) и прозрачность атмосферы (е), в легендах к кривым указаны длина волны излучения и день сентября 2017 года.

[Figure 7. Lidar signals (a), normalized modified scattering signals (б), scattering coefficients (в), scattering coefficients in details (г), dimensionless scattering length (д) and transparency of the atmosphere (е). The legends of the curves indicate the wavelength of the radiation and the day of September 2017.]

Сечения рассеяния света

Оценим сечения рассеяния N^+ , 532 нм и O^+ , 561 нм. Из рис. 7(г) на высоте 300 км, 05 сентября 2017 г. имеем $\rho_{532 \text{ нм}} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ км}^{-1}$ для N^+ и $\rho_{561 \text{ нм}} = 3 \cdot 10^{-8} \text{ км}^{-1}$ для O^+ .

Плотность N на высоте 300 км $n_N = 6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и плотность O на той же высоте $n_O = 6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ [14].

Плотность N^+ на высоте 300 км $n_{N^+} = 3 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ и плотность O^+ на той же высоте $n_{O^+} = 10^6 \text{ см}^{-3}$ [15]. Это дневные данные. Ночью ионизация на порядок меньше, поэтому будем использовать следующие значения: $n_{N^+} = 3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$ и $n_{O^+} = 10^5 \text{ см}^{-3}$.

Далее потребуются населенности нижнего и верхнего уровней, табл. 2. Населенности энергетических уровней можно оценить как 10^{-4} концентрации ионов [6]: $n_{\tilde{N}^+} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-3}$ и $n_{\tilde{O}^+} = 10 \text{ см}^{-3}$.

Для сечений рассеяния получаем $\sigma_{532 \text{ нм}} = 10^{-14} \text{ м}^2$ для \tilde{N}^+ и $\sigma_{561 \text{ нм}} = 3 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ для \tilde{O}^+ . Это грубые оценки сечений рассеяния. Для улучшения результата потребуются более точные значения населенностей энергетических уровней.

Следует отметить, что $\sigma_{532 \text{ нм}}/\sigma_{561 \text{ нм}} = 3 \cdot 10^3$. Для объяснения этого соотношения необходимо сравнить изменения электронных конфигураций ионов N^+ и O^+ в табл. 2, определяющие вероятности переходов между уровнями. В конфигурации N^+ мы видим электронный переход между уровнями $3p$ и $3d$ с неизменным электронным скелетом, рис. 8.



Рис. 8. Диаграмма Гротриана N^+ , 532 нм.
[Figure 8. Grotrian diagram of N^+ , 532 nm.]

В конфигурации O^+ мы видим переход электрона между уровнями 3s и 4p с изменением электронного скелета между уровнями 1S и 3P , рис. 9. Конечно, двухэлектронный переход менее вероятен чем одноэлектронный. Для сравнения интенсивностей переходов необходимо также знать населенности энергетических уровней, об оценке которых говорилось выше.

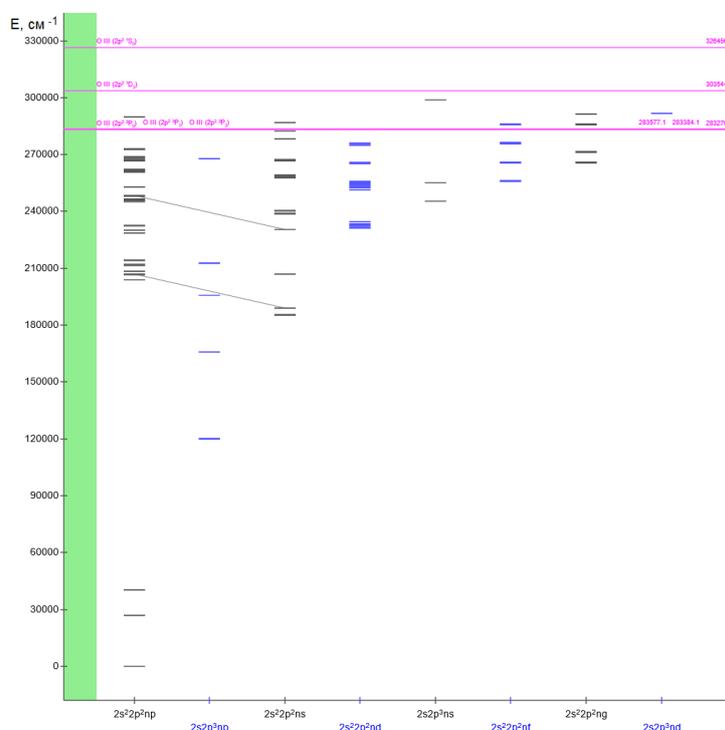


Рис. 9. Диаграмма Гротриана O^+ , 561 nm.
 [Figure 9. Grotrian diagram of O^+ , 561 nm.]

Из-за малых значений сечения рассеяния O^+ на длине волны 561 нм лидарный сигнал и коэффициент рассеяния на длине волны 561 нм меньше чем аналогичные параметры на длине волны 532 нм, несмотря на то, что концентрация O^+ на 2-3 порядка превышает концентрацию N^+ . Следовательно, аэрономический эффект O^+ на длине волны 561 нм меньше чем тот же эффект N^+ на длине волны 532 нм.

Обсуждение

Рассмотрены различные этапы развития термосферных лидарных наблюдений, от неожиданного обнаружения резонансного рассеяния в ионосфере [5] и изучения корреляций лидарных отражений с параметрами F2-слоя ионосферы [6] до много-частотных лидарных наблюдений в комплексе с радиозондированием [7, 11].

Недавно получены лидарные отражения в термосфере на возбужденных переходах атомарного гелия 1083 нм [8]. Благодаря этому появилась возможность для сравнения двух различных лидаров, существенно отличающихся по своим параметрам.

Многое прояснилось, но некоторые результаты пока не имеют однозначной интерпретации. Например, непонятно, как различать резонансное, рэлеевское и Ми рассеяния в средней атмосфере. Нет данных рассеяния на N_2^+ и зондирования авроральной термосферы во время высыпания заряженных частиц.

Плохая прозрачность атмосферы создает большие трудности для развития высотного лидарного зондирования. Необходимо использовать спутниковые лидары для зондирования термосферы. Дроны в стратосфере представляют интерес для размещения термосферных лидаров. По крайней мере, будет исключено сильное влияние прозрачности нижней атмосферы, которое хорошо видно на рис. 3, 4, 5, 6.

Концентрации возбужденных нейтральных компонентов термосферы на 4-5 порядков превышают концентрации рассмотренных выше возбужденных ионов. Представляет интерес исследование коллективных эффектов при резонансном рассеянии на нейтральных компонентах термосферы, которые могут возникать при увеличении концентрации рассеивателей [16].

Характеристики резонансного рассеяния света в термосфере получены с помощью широкополосного лидара. При низкой эффективности широкополосного лазера в резонансном зондировании его частоту легко настраивать для решения различных задач аэронавигации в термосфере.

Заключение

Лидарные сигналы термосферы и верхней стратосферы антикоррелируют.

Условия наблюдения лидарных отражений в термосфере в значительной степени определяются прозрачностью в верхней стратосфере.

Определены коэффициенты и сечения светорассеяния N^+ , 532 нм и O^+ , 561 нм.

Малое сечение рассеяния O^+ , 561 нм по сравнению с сечением рассеяния N^+ , 532 нм объясняется различиями в изменениях электронных конфигураций.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

Список литературы

1. Collins R. L., Lummerzheim D., Smith R. W. Analysis of lidar systems for profiling aurorally-excited molecular species, *Appl. Optics*, 1997. no. 36, pp. 6024-6034.
2. Gerrard A. J., et. al Investigation of a resonance lidar for measurement of thermospheric metastable helium, *JASTP*, 1997. vol. 59, no. 16, pp. 2023-2035.
3. Waldrop L. S., et. al Generation of metastable helium and the 1083 nm emission in the upper thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 2005. vol. 110, no. A08304 DOI:10.1029/2004JA010855.
4. Collins R. L., Su L., Lummerzheim D., Doe R. A. Investigating the Auroral Thermosphere with N_2^+ Lidar / *In Characterising the Ionosphere. Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 2*. Neuilly-sur-Seine, France, RTO, 2006, pp. 2-1-2-14 <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp> <https://www.researchgate.net/publication/233408410> RTO-MP-IST-056 2 -1.
5. Shevtsov B. M., et. al Stratospheric aerosol dynamics over Kamchatka and its association with geophysical processes, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009. vol. 49, no. 8, pp. 1302-1304 DOI: 10.1134/S0016793209080568.

6. Bychkov V. V., et. al Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka for 2008 to 2014 observations, *Earth Planet Sp.*, 2014. vol. 66, no. 150 DOI: 10.1186/s40623-014-0150-6.
7. Bychkov V. V., et. al Appearance of light-scattering layers in the thermosphere of Kamchatka during the autumn of 2017, *Proc. SPIE 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, Russian Federation*, 2018. no. 10833A4 DOI: 10.1117/12.2504539.
8. Kaifler B., Geach C., Büdenbender H. C. et al. Measurements of metastable helium in Earth's atmosphere by resonance lidar, *Nat Commun*, 2022. vol. 13, no. 6042.
9. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD TEAM. "NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.2)", 2021 <https://physics.nist.gov/asd>.
10. Bychkov V. V., Perezhogin A. S., Seredkin I. N. Resonant scattering by excited ions as an indicator of the precipitation of charged particles into the atmosphere, *E3S Web of Conferences: Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors*, 2018. vol. 62, no. 01011 DOI: 10.1051/e3sconf/20186201011.
11. Bychkov V. V., Seredkin I. N. Resonance scattering in the thermosphere as an indicator of superthermal electron precipitation, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2021. vol. 34, no. 1, pp. 26-33 DOI: 10.1134/S1024856021010048.
12. Shevtsov B. M., et. al Lidar for atmospheric transparency monitoring, *EPJ Web of Conferences*, 2021. vol. 254, no. 01003 DOI: 10.1051/epjconf/202125401003.
13. Shevtsov B. M., et. al Atmospheric Optical Characteristics in the Area of 30–400 km, *Remote Sens.*, 2022. vol. 14, no. 6108 DOI: 10.3390/rs14236108.
14. *NRLMSISE-00 Atmosphere Model*, 2022 URL: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>.
15. Richards P. G. Reexamination of ionospheric photochemistry, *JGR*, 2011. vol. 116, no. A8 DOI: 10.1029/2011JA016613.
16. Andreoli F., et. al Maximum Refractive Index of an Atomic Medium, *Phys. Rev. X*, 2021. vol. 11, no. 011026 DOI: 10.1103/PhysRevX.11.011026.



Шевцов Борис Михайлович ✉ – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия,  ORCID 0000-0003-0625-0361.



Перезжогин Андрей Сергеевич ✉ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования физических процессов, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия,  ORCID 0000-0003-3972-2919.



Середкин Илья Сергеевич ✉ – научный сотрудник лаборатории электромагнитных излучений, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, Елизовский район, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия,  ORCID 0000-0002-9483-9864.

Optical characteristics of the thermosphere and mesosphere

B. M. Shevtsov, A. S. Perezhogin, I. S. Seredkin

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS,
684034 Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia
E-mail: bshev@ikir.ru

Using lidar signals at wavelengths of 561 and 532 nm in the altitude range of 30–400 km, by solving the inverse problem, we restore the light scattering coefficients corresponding to these wavelengths, which makes it possible to compare the optical characteristics of the thermosphere, mesosphere and upper stratosphere and determine the relationship between the resonant, Rayleigh and aerosol scattering of light at different altitudes of the atmosphere. Using the scattering coefficients in the thermosphere, we find the cross sections of light scattering at wavelengths of 561 and 532 nm for the transitions of excited atomic oxygen and nitrogen ions and explain why the scattering coefficients for O^+ , 561 nm are smaller than for N^+ , 532 nm, while the concentration of O^+ is two orders of magnitude higher than N^+ . The results obtained here are of interest for understanding the ionization effect of solar activity on the optical characteristics of the atmosphere, which determine weather and climate changes.

Key words: optics of the atmosphere, resonant lidar, laser ionozond, lidar reflections in the thermosphere, coefficient and cross-section of light scattering, ionization, aerosol, solar activity, ion aeronomy.

 DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-191-208

Original article submitted: 01.12.2022

Revision submitted: 12.12.2022

For citation. Shevtsov B. M., Perezhogin A. S., Seredkin I. N. Optical characteristics of the thermosphere and mesosphere. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2022, 41: 4, 191–208. 

DOI: 10.26117/2079-6641-2022-41-4-191-208

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Shevtsov B. M., Perezhogin A. S., Seredkin I. N., 2022

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment on the topic «Physical processes in the system of near space and geospheres under solar and lithospheric influences» (No. AAAA-A21-121011290003-0).

References

- [1] Collins R.L., Lummerzheim D., Smith R.W. Analysis of lidar systems for profiling aurorally-excited molecular species, *Appl. Optics*, 1997, 36, 6024-6034.
- [2] Gerrard A. J., et. al. Investigation of a resonance lidar for measurement of thermospheric metastable helium, *JASTP*, 1997, 59, 16, 2023-2035.
- [3] Waldrop L.S., et. al. Generation of metastable helium and the 1083 nm emission in the upper thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, A08304. DOI:10.1029/2004JA010855
- [4] Collins R.L., Su L., Lummerzheim D., Doe R.A. Investigating the Auroral Thermosphere with N_2^+ Lidar. In *Characterising the Ionosphere. Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056, Paper 2.* Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2006, pp. 2-1-2-14. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>, <https://www.researchgate.net/publication/233408410> RTO-MP-IST-056 2 -1.
- [5] Shevtsov B. M., et. al. Stratospheric aerosol dynamics over Kamchatka and its association with geophysical processes, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, 49:8, pp. 1302-1304. DOI: 10.1134/S0016793209080568
- [6] Bychkov V. V., Nepomnyashchiy Yu. A., Perezhogin A. S., Shevtsov B. M. Lidar returns from the upper atmosphere of Kamchatka for 2008 to 2014 observations, *Earth Planet Sp.*, 2014, 66:150. DOI: 10.1186/s40623-014-0150-6
- [7] Bychkov V. V., et al. Appearance of light-scattering layers in the thermosphere of Kamchatka during the autumn of 2017, *Proc. SPIE*, 10833, 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Tomsk, Russian Federation, 2018, 10833A4. DOI: 10.1117/12.2504539
- [8] Kaifler B., et al. Measurements of metastable helium in Earth's atmosphere by resonance lidar, 2022, *Nat Commun*, 13, 6042.
- [9] Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD TEAM. «NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.2)», 2021. <https://physics.nist.gov/asd>
- [10] Bychkov V. V., Perezhogin A. N., Sereдкин I. N. Resonant scattering by excited ions as an indicator of the precipitation of charged particles into the atmosphere, *E3S Web of Conferences, Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors*, 2018, 62, 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/20186201011
- [11] Bychkov V. V., Sereдкин I. N. Resonance scattering in the thermosphere as an indicator of superthermal electron precipitation, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2021, vol. 34, no. 1, pp. 26-33. DOI: 10.1134/S1024856021010048
- [12] Shevtsov B. M., Bychkov V. V., Perezhogin A. N., Sereдкин I. N. Lidar for atmospheric transparency monitoring, *EPJ Web of Conferences*, 2021, 254, 01003. DOI: 10.1051/epjconf/202125401003
- [13] Shevtsov B. M., Bychkov V. V., Perezhogin A. N., Sereдкин I. N. Atmospheric Optical Characteristics in the Area of 30-400 km, *Remote Sens.*, 2022, 14, 6108. DOI: 10.3390/rs14236108
- [14] NRLMSISE-00 Atmosphere Model, 2022. <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>
- [15] Richards P. G. Reexamination of ionospheric photochemistry, *JGR*, 2011, 116, A8. DOI: 10.1029/2011JA016613
- [16] Andreoli F., Gullans M. J., High A. A., Browaeys A., Chang D. E. Maximum Refractive Index of an Atomic Medium, *Phys. Rev. X*, 2021, 11, 011026. DOI: 10.1103/PhysRevX.11.011026



Shevtsov Boris Mikhaylovich ✉ – D. Sci. (Phys. & Math.), Chief Researcher, Laboratory of Electromagnetic Radiation, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 7, st. Mirnaya, Paratunka, Kamchatka, Russia,  ORCID 0000-0003-0625-0361.



Perezhogin Andrey Sergeevich ✉ – Candidate for Ph.D. of Physico-mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Modeling of Physical Processes, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 7, st. Mirnaya, Paratunka, Kamchatka, Russia,  ORCID 0000-0003-3972-2919.



Seredkin Ilya Sergeevich ✉ – Researcher, Laboratory of Electromagnetic Radiation, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, 7, st. Mirnaya, Paratunka, Kamchatka, Russia,  ORCID 0000-0002-9483-9864
