

ТЕРАВАТТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

¹Бурнашов А.В., ¹Ошлаков В.К., ¹Иглакова А.Н., ^{1,2}Бабушкин П.А.

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, e-mail: bvaleksey@iao.ru;*

²*Томский государственный университет, Томск, e-mail: bvaleksey@iao.ru*

Одним из ведущих научных институтов в России по изучению динамики атмосферы с точки зрения оптических и микрофизических характеристик является Институт оптики атмосферы СО РАН. Одним из главных направлений является изучение распространения оптических волн и дистанционное зондирование. В рамках данного направления ведутся работы по определению характеристик выбросов с предприятий атомной и нефтехимической промышленности, что актуально, так как вблизи находятся Сибирский химический комбинат (СХК, Росатом) и Томский нефтехимический завод (ТНХК, ТВЭЛ). Также важными можно считать исследования оптических и микрофизических характеристик перистой облачности, так как вклад от нее сопоставим с вкладом парниковых газов в парниковый эффект, под воздействием которого крупный айсберг откололся от Антарктиды. Третьей областью исследований следует выделить изучение взаимодействия мощного тераваттного излучения с компонентами естественного и искусственного происхождения, с атмосферой и ее составляющими с целью обеспечения дальнего распространения оптического излучения, с разработкой новых методов зондирования и определения необходимых характеристик различных сред. Это стало возможным благодаря бурному развитию лазерной техники и уменьшению блоков лазерных систем. Это позволило иметь относительно компактные лазерные системы, генерирующие мощные фемтосекундные лазерные импульсы. Применение лазерных технологий в настоящее время и их дальнейшее развитие, новые знания в физике атмосферы – все это позволит уменьшить негативное влияние деятельности человека на окружающую среду. Были проведены серии натурных и численных экспериментов с целью определения возможности использования мощного тераваттного фемтосекундного излучения для дистанционного зондирования атмосферы. На основе анализа полученных результатов сделан вывод о возможности и перспективности использования фемтосекундного излучения в задачах зондирования.

Ключевые слова: зондирование, фемтосекундный импульс, суперконтинуум, лидар, коническая эмиссия, филамент, лазерное излучение

TERAWATT RADIATION IN THE CASE OF REMOTE SENSING

¹Burnashov A.V., ¹Oshlakov V.K., ¹Iglakova A.N., ^{1,2}Babushkin P.A.

¹*Institute of Atmospheric Optics, Tomsk, e-mail: baleksey@iao.ru;*

²*Tomsk State University, Tomsk, e-mail: bvaleksey@iao.ru*

One of the leading scientific institutes in Russia on the study of atmospheric dynamics from the point of view of optical and microphysical characteristics is the Institute of Atmospheric Optics of the SB RAS. One of the main directions is the study of the propagation of optical waves and remote sensing. In this direction, work is underway to determine the characteristics of emissions from enterprises of the nuclear and petrochemical industries, which is important, as the Siberian Chemical Combine (SChC, Rosatom) and Tomsk Petrochemical Combine (TPChC, TVEL) are close to it. Also important is the study of optical and microphysical characteristics of cirrus clouds, since the contribution from it is comparable to the contribution of greenhouse gases to the greenhouse effect, under the influence of which a large iceberg from Antarctica has been separated. The third area of research should be the study of the interaction of high-power terawatt radiation with components of natural and artificial origin, with the atmosphere and its components in order to ensure the long-range propagation of optical radiation and the development of new methods for sensing and determining the necessary characteristics of various media. This became possible due to the rapid development of laser technology and the reduction of blocks of laser systems. This has allowed relatively compact laser systems that generate powerful femtosecond laser pulses. The use of laser technologies at present and their further development, new knowledge in atmospheric physics will all reduce the negative impact of human activities on the environment. A series of natural and numerical experiments were conducted to determine the possibility of using a powerful terawatt femtosecond radiation for remote sensing of the atmosphere. Based on the analysis of the results obtained, a conclusion is made about the possibility and prospects of using femtosecond radiation in probing problems.

Keywords: remote sensing, femtosecond pulse, supercontinuum, lidar, conical emission, filament, laser radiation

Одной из главных задач атмосферной оптики является корректная интерпретация характеристик атмосферы и различных атмосферных образований [1–3] как экспериментально, так и теоретически и попытка их обобщения для дальнейшего использования. С развитием лазерных технологий все большее внимание стало уделяться возможности зондирования атмосферы лидарными

методами с использованием лазеров, генерирующих мощное тераваттное и мультитераваттное излучение [4–9]. На первых этапах численного моделирования рассеяния света рассматривается излучение на длине волны 0,55 мкм, например [10–14], и в дальнейшем в зависимости от поставленных задач включаются, например, различные длины волн, поляризация излучения, тур-

булентность атмосферы и т.д. Отдельной задачей стоит зондирование окружающей среды предельно короткими (по отношению к длине волны зондирования) импульсами. Создаются системы зондирования на основе лазеров, излучающих импульсы длительностью от нескольких десятков фемтосекунд, проводятся эксперименты по исследованию окружающей среды (атмосферы, водной и земной поверхности, растительного покрова, облачности) с целью регистрации сигналов флуоресценции, определения состава атмосферы на трассах до десятков километров, высвечиваемых излучением «суперконтинуума», возникающего в результате спектрального и временного уширения зондирующего импульса [4–9]. За счет эффектов фемтосекундной нелинейной оптики спектр трансформированного излучения расширяется на несколько спектральных октав – от ультрафиолетовой до средней и даже дальней инфракрасных областей. Параметры излучения СК остаются в пределах параметров лазерного излучения. И, как следствие, излучение СК признано перспективным для лазерного зондирования атмосферы.

Материалы и методы исследования

Основная цель данной работы – изучение возможности применения сверхкоротких лазерных импульсов в задачах зондирования. Методической основой проекта является комплексность исследований, сочетающая в себе натурные, лабораторные, численные эксперименты, использование современной материальной базы.

Основной метод, используемый в экспериментальной части данной работы, – метод лазерного зондирования окружающей среды и различных трасс распространения (включая более плотные, чем воздух, образования различной природы) мощными фемтосекундными импульсами (регулируемая энергия импульса от 10 до 100 мДж длительностью несколько десятков фемтосекунд). Применение данного активного метода зондирования по изучению распространения мощного тераваттного фемтосекундного импульса базируется на использовании фемтосекундной лазерной системы Института оптики атмосферы СО РАН [5, 6]. Основные подходы в экспериментальной части работы при использовании мощного тераваттного излучения фемтосекундного Ti-Sa лазера будут следующие:

1) использование различных схем лазерного зондирования (излучатель и при-

емник располагаются либо в одном месте, либо разнесены в одной горизонтальной плоскости);

2) в качестве зондирующего излучения в режиме генерации суперконтинуума будут использоваться длины волн 785–815 нм (длительность 20 фс, энергия 10–100 мДж, мощность 0,5–5 тВт);

3) использование второй и третьей гармоники.

Еще одной составляющей при выполнении данного проекта предполагается использование метода статистического и численного моделирования. В частности, использование разработанной программы в ИОА СО РАН при непосредственном участии членов научного коллектива [10–14] на основе метода геометрической оптики. Данный программный продукт позволяет решить задачу по рассеянию света на ледяных кристаллах перистой облачности, что дает возможность объяснить получаемые экспериментальные данные при дистанционном зондировании атмосферных трасс с учетом наличия на них ледяных кристаллических частиц, а также перистой облачностью. Комплексный подход по исследованию характеристик распространения мощного фемтосекундного лазерного излучения, например оптоакустических, геометрических, физических, колориметрических, позволяет получить более точную информацию об особенностях распространения тераваттного излучения в атмосфере. Численное решение уравнения лазерного зондирования с различными начальными характеристиками делает возможной интерпретацию полученных результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

В данной работе зондирование слоя облачности проводилось под углом 30° относительно горизонта (рис. 1). Для выделения излучения обратного рассеяния в спектре СК был установлен фильтр СЗС 23.

Спектральный диапазон его работы практически совпадает с полосой пропускания используемого ФЭУ, что позволило регистрировать обратное рассеяние от СК на длинах волн 0,35–0,65 мкм и 1–1,1 мкм. При проведении зондирования установленный фильтр толщиной 2 мм полностью не пропускал рабочую (лазерную) длину волны. На рис. 1 представлен спектр обратного рассеяния от слоя облачности.

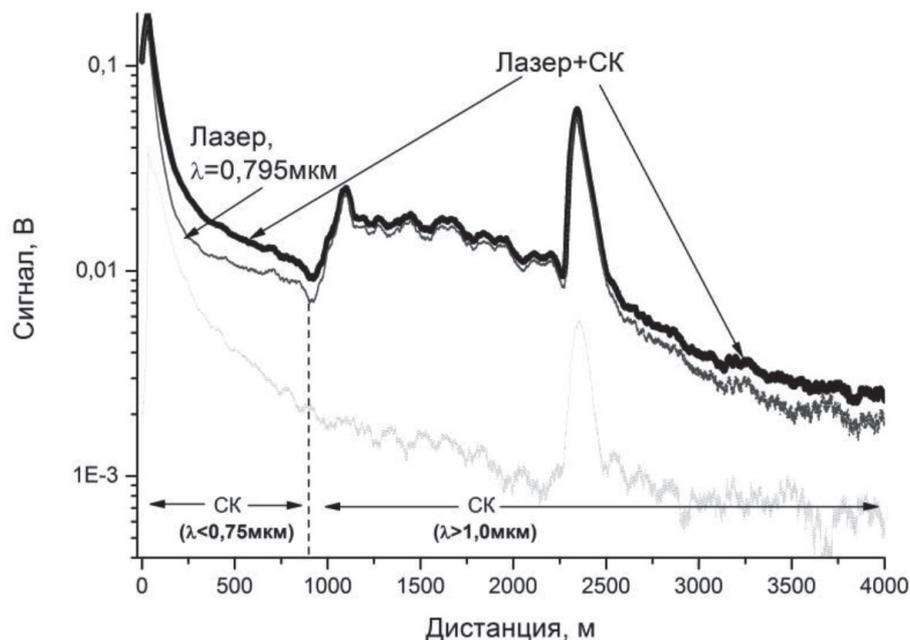


Рис. 1. Запись лидарного сигнала от слоя облачности при зондировании на наклонной трассе: черный – излучение обратного рассеяния на сумме длин волн лазерная + СК; темно-серый – обратное рассеяние на лазерной длине волны 0,8 мкм; светло-серый – обратное рассеяние на длинах волн СК

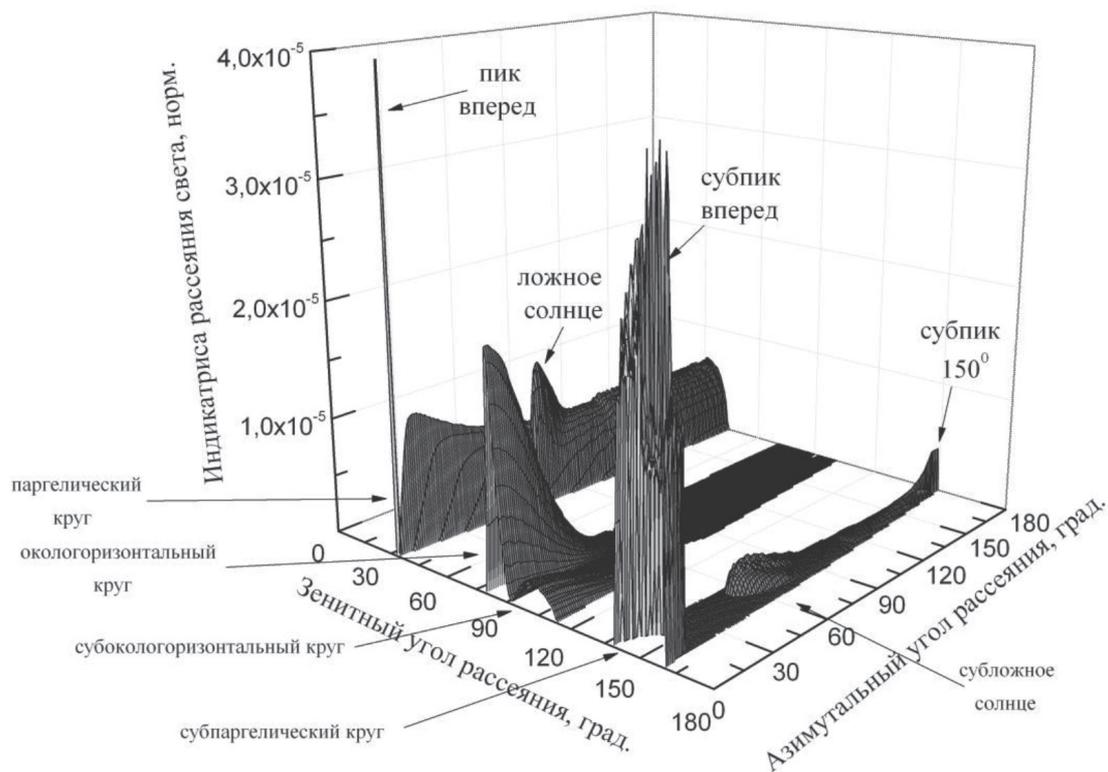


Рис. 2. Сфера направлений рассеяния света при длине волны 0,55 мкм на ледяных кристаллических пластинчатых кристаллах перистой облачности при угле падения 30° относительно зенита

По данным зондирования был оценен показатель ослабления лазерного излучения вдоль трассы. Судя по его высотному распределению и протяженности слоя облачности можно предположить, что на участке 450–600 м находилась слоистая облачность, высота основания которой обычно составляет 0,1–0,7 км, а толщина слоя – от 0,2 до 0,8 км. На участке 1150–1250 м – слоисто-кучевая облачность. Высота основания составляет 0,5–1,5 км, толщина слоя – от 0,2–0,8 км.

Вторая часть работы заключалась в численном моделировании рассеяния света на длине волны 0,55 мкм на примере наиболее распространенных ледяных кристаллов перистой облачности, гексагональных пластинок и столбиков (рис. 2).

Отметим, что актуальность проводимых исследований подтверждается тем, что, во-первых, натурные измерения влияния перистой облачности показывают, что вклад в парниковый эффект от ее наличия в атмосфере сопоставим с вкладом от парниковых газов, образующихся от жизнедеятельности человечества. Во-вторых, фемтосекундную систему ИОА СО РАН можно использовать для изучения перистых облаков как 0,55 мкм, так и с помощью волнового пакета. Дальнейшая модификация численного алгоритма для расчета на других длинах волн позволит установить основные закономерности изменений в матрице Мюллера.

Несмотря на то, что данная задача была частично рассмотрена [10–14], следует уделить отдельное внимание задаче рассеяния света на горизонтально и преимущественно ориентированных гексагональных пластинках при различных начальных параметрах. Во-первых, потому что, как уже было отмечено, формы данных кристаллических частиц являются наиболее распространенными. Во-вторых, ледяные гексагональные пластинки вносят главенствующий вклад в образование наиболее часто встречаемых гало, например, таких как паргелический круг (Parhelic circle), субпаргелический круг (Subparhelic circle), ложное солнце (Sundog) паргелий 120° (Parhelion 120°). В-третьих, последние исследования по лидарному зондированию перистой облачности показали [15], что для определения наличия ориентированных гексагональных кристаллов предпочтительным является использование сканирующего лидара и выбора наиболее информативного элемента по поляризационным характеристикам. А от ориентации кристаллов, ее частоты существования за-

висит зеркальное отражение солнечного излучения, которое дает вклад в парниковый эффект.

Исходя из анализа геометрии пучков в кристаллах, были сделаны следующие выводы. В соответствии с законом Снеллиуса ($\theta = \arcsin(n_2/n_1)$), если присутствует полное внутреннее отражение, то энергия пучка без потерь остается в пучке в данной среде распространения. При этом линейная поляризация света остается линейной с возможным наклоном. Круговая поляризация образуется лишь, когда присутствует полное внутреннее отражение. Как было показано ранее, если углы падения света на шестигранники пластинчатых кристаллов лежат промежутке $\pi/2 - \theta^* < \theta_0 < \theta^*$, где $\theta^* \approx 58^\circ$ [11–13], то можно утверждать, что присутствует эффект полного внутреннего отражения. Вследствие геометрии наиболее распространенных кристаллов перистых облаков получим при параметре формы 0,4 с учетом, что угол между вертикалью и направлением распространения излучения будет примерно 34 градуса, будет присутствовать траектория с сохранением энергии излучения внутри кристалла. При уменьшении относительных размеров частицы рассмотренная траектория будет видоизменяться путем добавления дополнительных траекторий с дополнительными полными отражениями от шестиугольных граней. И, как следствие, будет происходить постепенное увеличение доли рассеянной компоненты M_{44} .

Таким образом, было показано, что на основе анализа поведения рассеянного на кристаллах излучения можно сделать вывод об относительных размерах частиц. Дальнейшая модификация алгоритма предполагает как лабораторные исследования процесса распространения излучения, например, фемтосекундной длительности уже в различных кристаллах, так и натурные эксперименты на основной длине волны Ti:Sapphire лазера и конической эмиссии суперконтинуума. Совместные исследования атмосферы широким диапазоном спектра КЭ СК и TomSky позволят дать более детальную информацию о состоянии и динамике атмосферы.

Заключение

Результаты проведенных экспериментов позволили сделать вывод, что зондирование можно проводить как на основной длине волны лазера, так и на второй, третьей и даже четвертой гармонике. Для реализа-

ции гармоник, отличных от лазерной, могут быть использованы преобразователи частоты в виде нелинейных кристаллов или пере-страиваемый лазер.

В экспериментальной части работы использовалась уникальная фемтосекундная система, характеристики которой кратко описаны выше, в совокупности с телескопом конструкции Ньютона с диаметром главного зеркала 30 см и фокусным расстоянием 80 см. Были получены результаты по распределению энергии тераваттного излучения между приосевой частью лазерного излучения и конической эмиссии суперконтинума.

В численной части на основе метода геометрической оптики было исследовано поведение элементов матрицы рассеяния и определен наиболее чувствительный элемент для идентификации размеров частиц на длине волны 0,55 мкм. С одной стороны, полученные данные могут быть использованы в интерпретации получаемых обратных сигналов. С другой стороны, модификация численного алгоритма позволит сделать расчеты как для других длин волн, в частности для основной длины волны Ti:Sapphire лазера 0,8 мкм, так и для других кристаллических структур.

На основе полученных данных был сделан вывод о перспективности применения фемтосекундного излучения для широкого круга исследований вследствие отсутствия необходимости перестройки лазера на одной длине волны и возможности получения экспериментальных данных сразу на совокупности длин волн, что повышает оперативность получения информации в широком спектральном диапазоне и позволяет более точно определять разнообразные характеристики зондируемой атмосферы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00173 мол_а и РНФ № 16-17-10128.

Список литературы

1. Kolotkov G.A., Penin S.T. Computation of radiation power from standard radioactive emissions of radiochemical plant at frequencies of 1420 and 1665–1667 MHz // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2014. – vol. 27. – № 4. – P. 320–323.
2. Колотков Г.А., Пенин С.Т. Физико-химические характеристики искусственно ионизированных образований в атмосфере // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2016. – Т. 59, № 12–3. – С. 37–40.
3. Kolotkov G., Penin S. Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2013. – vol. 115. – P. 69–72.
4. Множественная филаментация лазерных пучков различного диаметра в воздухе на трассе длиной 150 м / Д.В. Апексимов [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – Т. 29, № 01. – С. 51–55.
5. Постфиламентационные световые каналы в воздухе / Д.В. Апексимов [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. – 2017. – Т. 30, № 04. – С. 291–295.
6. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А. Филаментация пуга ультракоротких лазерных импульсов в воздухе // *Оптика атмосферы и океана*. – 2017. – Т. 30, № 12. – С. 1001–1007.
7. Филаментация фемтосекундных ИК и УФ импульсов при фокусировке в воздухе / А.А. Дергачев [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2013. – Т. 43, № 1. – С. 29–36.
8. Shipilo D.E., Panov N.A., Sunchugasheva E.S., Mokrousova D.V., Shutov A.V., Zvorykin V.D., Ustinovskii N.N., Seleznev L.V., Savel'ev A.B., Kosareva O.G., Chin S.L., Ionin A.A. Fifteen meter long uninterrupted filaments from subterawatt ultraviolet pulse in air // *Optics Express*. – 2017. – vol. 25. – № 21. – P. 25386–25391.
9. Polynkin P. Multi-pulse scheme for laser-guided electrical breakdown of air // *Appl. Phys. Lett.* – 2017. – vol. 111. – № 161102. – P. 161102-1–161102-5.
10. Бурнашов А.В., Боровой А.Г. Рассеяние света горизонтально ориентированными столбиками // *Оптика атмосферы и океана*. – 2008. – Т. 21, № 11. – С. 922–930.
11. Бурнашов А.В., Боровой А.Г. Рассеяние света горизонтально ориентированными ледяными пластинками. II. Матрица рассеяния // *Оптика атмосферы и океана*. – 2007. – Т. 20, № 11. – С. 966–972.
12. Borovoi A.G., Burnashov A.V., Oppel U.G. Scattering matrices for horizontally oriented ice crystals // *JQSRT*. – 2008. – vol. 109. – № 15. – P. 2648–2655.
13. Бурнашов А.В., Боровой А.Г. Рассеяние света горизонтально ориентированными ледяными пластинками. I. Интенсивность рассеянного света // *Оптика атмосферы и океана*. – 2007. – Т. 20, № 07. – С. 583–592.
14. Бурнашов А.В., Коношонкин А.В. Матрица рассеяния света на усеченном пластинчатом дроксталле, ориентированном преимущественно в горизонтальной плоскости // *Оптика атмосферы и океана*. – 2012. – Т. 25, № 12. – С. 1043–1050.
15. Коношонкин А.В. Моделирование сигнала сканирующего лидара от монодисперсного облака квазигоризонтально ориентированных частиц / А.В. Коношонкин // *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – Т. 29, № 12. – С. 1053–1060.

References

1. Kolotkov G.A., Penin S.T. Computation of radiation power from standard radioactive emissions of radiochemical plant at frequencies of 1420 and 1665–1667 MHz // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2014. vol. 27. no. 4. pp. 320–323.
2. Kolotkov G.A., Penin S.T. Fiziko-himicheskie karakteristiki iskusstvenno ionizirovannykh obrazovaniy v atmosfere // *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Fizika*. 2016. T. 59, no. 12–3. pp. 37–40.
3. Kolotkov G., Penin S. Remote monitoring of emission activity level from NPP using radiofrequencies 1420, 1665, 1667 MHz in real time // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2013. vol. 115. pp. 69–72.
4. Mnozhestvennaja filamentiacija lazernyh puchkov razlichnogo diametra v vozduhe na trasse dlinoj 150 m / D.V. Apeksimov [i dr.] // *Optika atmosfery i okeana*. 2016. T. 29, no. 01. pp. 51–55.
5. Postfilamentacionnye svetovye kanaly v vozduhe / D.V. Apeksimov [i dr.] // *Optika atmosfery i okeana*. 2017. T. 30, no. 04. pp. 291–295.
6. Gejnc Ju.Je., Zemljanov A.A. Filamentiacija cuga ultrakorotkih lazernyh impulsov v vozduhe // *Optika atmosfery i okeana*. 2017. T. 30, no. 12. pp. 1001–1007.

7. Filamentacija femtosekundnyh IK i UF impulsov pri fokusirovke v vozduhe / A.A. Dergachev [i dr.] // Kvantovaja jelektronika. 2013. T. 43, no. 1. pp. 29–36.
8. Shipilo D.E., Panov N.A., Sunchugasheva E.S., Mokrousova D.V., Shutov A.V., Zvorykin V.D., Ustinovskii N.N., Seleznev L.V., Savelev A.B., Kosareva O.G., Chin S.L., Ionin A.A. Fifteen meter long uninterrupted filaments from sub-terawatt ultraviolet pulse in air // Optics Express. 2017. vol. 25. no. 21. pp. 25386–25391.
9. Polynkin P. Multi-pulse scheme for laser-guided electrical breakdown of air // Appl. Phys. Lett. 2017. vol. 111. no. 161102. pp. 161102-1–161102-5.
10. Burnashov A.V., Borovoj A.G. Rassejanie sveta gorizontarno orientirovannymi stolbikami // Optika atmosfery i okeana. 2008. T. 21, no. 11. pp. 922–930.
11. Burnashov A.V., Borovoj A.G. Rassejanie sveta gorizontarno orientirovannymi ledjanymi plastinkami. II. Matrica rassejanija // Optika atmosfery i okeana. 2007. T. 20, no. 11. pp. 966–972.
12. Borovoi A.G., Burnashov A.V., Opiel U.G. Scattering matrices for horizontally oriented ice crystals // JQSRT. 2008. vol. 109. no. 15. pp. 2648–2655.
13. Burnashov A.V., Borovoj A.G. Rassejanie sveta gorizontarno orientirovannymi ledjanymi plastinkami. I. Intensivnost rassejannogo sveta // Optika atmosfery i okeana. 2007. T. 20, no. 07. pp. 583–592.
14. Burnashov A.V., Konoshonkin A.V. Matrica rassejanija sveta na usechenom plastinchatom drokstalle, orientirovannom preimushhestvenno v gorizontальной ploskosti // Optika atmosfery i okeana. 2012. T. 25, no. 12. pp. 1043–1050.
15. Konoshonkin A.V. Modelirovanie signala skanirujushhego lidara ot monodispersnogo oblaka kvazigorizontarno orientirovannyh chastic / A.V. Konoshonkin // Optika atmosfery i okeana. 2016. T. 29, no. 12. pp. 1053–1060.