

## СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЛАЗЕРНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА С ДАННЫМИ СПУТНИКОВОГО СПЕКТРОРАДИОМЕТРА MODIS

*И.В. Самохвалов<sup>1</sup>, О.Ю. Локтюшин<sup>1</sup>, И.Д. Брюханов<sup>1,2</sup>, К.Н. Пустовалов<sup>1,3</sup>,  
Е.В. Ни<sup>1</sup>, А.А. Дорошкевич<sup>1</sup>, И.В. Животенюк<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, Томск, пр. Ленина, 36

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, 1

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, Томск, пр. Академический, 10/3

**Аннотация.** Статья посвящена описанию методики обработки, ее программной реализации и результатам применения совместной обработки данных поляризационного лазерного зондирования облаков верхнего яруса (ОВЯ) наземным лидаром с данными надирного зондирования ОВЯ спутниковым спектрорадиометром с целью оценки влияния горизонтально ориентированных ледяных частиц в ОВЯ на отражение лучистой энергии.

**Ключевые слова:** облака верхнего яруса, конденсационные следы самолетов, поляризационный лидар, матрица обратного рассеяния света, спектрорадиометр MODIS.

### Введение

В современных численных моделях прогнозирования погоды и климата присутствуют некоторые упрощения и допущения, касающиеся учета атмосферных процессов и явлений. Одним из таких значимых факторов, который требует более детального рассмотрения, являются облака верхнего яруса (ОВЯ). Эти облака оказывают существенное влияние на радиационный баланс Земли [1], одновременно отражая солнечную радиацию и усиливая парниковый эффект за счет возвращения части инфракрасного излучения к поверхности планеты. ОВЯ характеризуются значительной горизонтальной протяженностью, достигающей тысячи километров [2], что позволяет им покрывать до 50% земной поверхности [3]. Из-за своих масштабов и двойственной роли в радиационных процессах эти облака требуют более точного учета в климатических моделях. Совершенствование параметризации ОВЯ в численных моделях позволит повысить точность прогнозов погоды и климата, а также улучшить понимание сложных взаимосвязей между характеристиками ОВЯ и глобальными радиационными процессами в атмосфере Земли.

В последние десятилетия количество антропогенных ОВЯ значительно возросло в результате увеличения числа среднесуточного количества авиaperелетов. Конденсационные следы самолетов, подобно естественным ОВЯ, преимущественно состоят из ледяных частиц несферической формы, которые обладают определенной пространственной ориентацией. Всемирная метеорологическая организация именует долгоживущие (более 10 минут) самолетные следы и образующиеся из них перистые облака единственным искусственным типом кристаллических облаков [4]. Следы самолетов, образующиеся в результате выбросов авиационных двигателей, отличаются по своей структуре от естественных перистых облаков [5]. Хотя и те, и другие влияют на пропускную способность атмосферы, конденсационные следы характеризуются иной

формой и значительно более высокой концентрацией кристаллов льда по сравнению с перистыми облаками [6]. Изменения в микрофизических и радиационных характеристиках облаков, вкуче с антропогенным воздействием, могут оказывать значительное влияние на климат Земли, оценка этого влияния является одним из основных неопределенных факторов в настоящее время.

Методы исследования микроструктуры ОВЯ, можно разделить на две основные группы: контактные и дистанционные. Контактные методы не позволяют определить ориентацию ледяных кристаллов, так как она нарушается при заборе проб. Одним из наиболее перспективных бесконтактных методов исследования является лидарное зондирование ОВЯ, благодаря многообразию эффектов взаимодействия оптических волн со средой. Помимо лидарного зондирования для получения информации об облаках (в том числе ОВЯ) используются методы спутникового зондирования Земли из космоса. Спутники с такими радиометрами как MODIS (англ.– “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer”) [7, 8] способны получать спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) рассеянных ОВЯ потоков лучистой энергии.

### **Метод лидарного зондирования ОВЯ, включая конденсационные следы самолетов**

Для определения формы и пространственной ориентации частиц в облаках используется поляризационное свойство лазерного излучения. При взаимодействии с исследуемой средой состояние поляризации оптического излучения существенно меняется. Следовательно, анализ этих изменений поляризации может быть применен для изучения характеристик рассеивающей среды. Метод поляризационного лазерного зондирования основан на идее использования изменения состояния поляризации при исследовании рассеивающих сред [9]. Согласно этому методу, в атмосферу последовательно посылаются лазерные пучки с четырьмя различными состояниями поляризации с соответствующими вектор-параметрами Стокса [10]. Затем регистрируются четыре компоненты вектора Стокса обратно рассеянного излучения для каждого состояния поляризации зондирующего пучка. Влияние рассеивающей среды на изменение поляризации излучения при их взаимодействии определяется микроструктурой этой среды, то есть параметрами распределения частиц по размерам, формам и пространственной ориентации. Таким образом, анализируя изменения поляризации, можно определять характеристики рассеивающей среды.

Этот метод реализован [11] в высотном матричном поляризационном лидаре (ВМПЛ) Томского государственного университета. ВМПЛ позволяет зондировать аэрозольные слои на высотах до 15 км при условиях отсутствия облаков нижнего и среднего яруса. В качестве источника зондирующего излучения используется вторая гармоника твердотельного лазера на алюмо-иттриевом гранате («YAG»,  $Y_3Al_5O_{12}$ ), легированном ионами неодима (Nd). Длина волны излучения составляет 532 нм, энергия импульса – до 400 мДж, частота следования импульсов – 10 Гц. Для изменения состояния поляризации зондирующего излучения используется поляризационная приставка. Она представляет собой диск с четырьмя окнами, в трех из которых установлены поляризационные элементы. Первое окно – пустое. Во втором установлен вращатель плоскости поляризации на  $90^\circ$  относительно плоскости референции. В третье окно вставлена четвертьволновая фазовая пластинка, ориентированная оптической осью под углом  $45^\circ$  к плоскости референции. В четвертом окне помещается вращатель плоскости поляризации на  $45^\circ$  относительно плоскости референции. Приемной антенной служит зеркальный объектив Кассегрена с диаметром главного зеркала 0,5 м и фокусным расстоянием 5 м.

Обработка лидарного сигнала основана на уравнении лазерного зондирования в приближении однократного рассеяния, которое в векторной форме имеет вид [12]:

$$\vec{S}(z) = \eta \frac{c\tau_u}{2} \frac{A_0}{z^2} G(z) \hat{M}_\pi(z) \vec{S}_0 T^2(z), \quad (1)$$

где  $\vec{S}(z)$  – вектор Стокса регистрируемого сигнала,  $\hat{M}_\pi$  – матрица обратного рассеяния света (МОРС),  $\vec{S}_0$  – вектор Стокса посылаемого излучения,  $\eta$  – суммарный коэффициент пропускания компонентами приемной оптической системы,  $c$  – скорость света,  $\tau_u$  – длительность лазерного импульса,  $A_0$  – площадь входной апертуры приёмного объектива,  $z$  – высота, с которой принят сигнал,  $G(z)$  – геометрическая функция лидара,  $T$  – прозрачность атмосферы в диапазоне высот  $[0, z]$ .

В результате решения системы из 4 векторных уравнений получается полная матрица обратного рассеяния света (МОРС) (размерностью 4x4) для исследуемого объема рассеивающей среды. МОРС содержит в себе исчерпывающую информацию о микроструктуре рассеивающего объема, такую как параметры распределения частиц по размерам, форме частиц и их ориентациям. Облака с преимущественной горизонтальной ориентацией ледяных частиц (зеркальные) идентифицируются согласно критерию [12]: отношение рассеяния  $R \geq 10$ , оптическая толщина  $\tau \leq 1$  и элемент МОРС  $m_{44} \leq -0,4$ .

Эксперименты по зондированию атмосферы на ВМПЛ непрерывно осуществляются с 2009 г. С сентября 2009 г. по апрель 2023 г. на нем произведено более 3100 серий измерений (около 800 часов); из них в более чем 1300 серий были зарегистрированы ОВЯ. В работе [13] подробно описаны оптические и геометрические характеристики ОВЯ.

Для определения времени появления самолетных следов в поле зрения лидара НИ ТГУ применяется методика, которая основана на совместном анализе данных о движении самолетов и метеорологических данных. Сопоставление самолетных траекторий с данными о ветре на соответствующих высотах позволяет оценить расстояние и время, за которое след самолета будет дрейфовать до места расположения лидара и, самое главное, определить какой участок конденсационного следа появиться над лидаром. Согласно методике, для каждой точки траектории самолета в радиусе 100 км от лидара вычисляются расстояние до лидара и азимутальный угол направления от лидара на эту точку траектории. Расстояние от точки траектории (т.  $T$ ) до места расположения лидара (т.  $L$ ) рассчитывается на основе их координат [14]:

$$d_{TL} = R \cdot \arccos(\sin(Lat_T) \cdot \sin(Lat_L) + \cos(Lat_T) \cdot \cos(Lat_L) \cdot \cos(Lng_T - Lng_L)), \quad (2)$$

где  $R$  – средний радиус Земли,  $Lat_T$  и  $Lng_T$  – широта и долгота точки траектории,  $Lat_L$  и  $Lng_L$  – широта и долгота места расположения лидара.

После того, как совокупность точек траектории самолета в радиусе 100 км от лидара определена описанным ранее способом, осуществляется поиск и загрузка метеорологических данных, соответствующих дате, времени и высоте каждой из этих точек траектории [15]. Затем для каждой выделенной точки траектории вычисляется направление ветра, при котором участок самолетного следа, образованный в этой точке, будет дрейфовать и в конечном итоге попадет в поле зрения лидара. Таким образом, анализируя траекторные данные совместно с информацией о ветре на высоте полета, определяется направление, откуда следует ожидать появления самолетного следа в поле зрения лидара для каждой точки траектории в заданном радиусе [16].

$$\theta_{LT} = \arctg \left( \frac{\sin(Lng_L - Lng_T) \cdot \cos(Lat_L)}{\cos(Lat_T) \cdot \sin(Lat_L) - \sin(Lat_T) \cdot \cos(Lat_L) \cdot \cos(Lng_L - Lng_T)} \right). \quad (3)$$

В случае  $|\theta_{LT} - \theta_{ветра}| \leq 5^\circ$  вычисляется время дрейфа к лидару выделенного участка конденсационного следа на основании рассчитанного расстояния  $d_{TL}$  и скорости ветра [14]. При этом предполагается, что направление и скорость ветра в течение дрейфа самолетного следа к лидару остаются постоянными. В качестве источника метеорологической информации выступает реанализ ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [17]. В качестве исходных данных в нём используются результаты измерений со всего земного шара: спутниковыми радиометрами, наземными, корабельными и самолётными метеостанциями, метеобуями, радиозондами, наземными радарными. Актуальная версия реанализа обеспечивает высокое пространственно–временное разрешение ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , 1 час) и объединяет непрерывные ряды метеоданных с 1979 г. по настоящее время.

### Спутниковый спектрометрический радиометр MODIS

MODIS – это ключевой инструмент на борту спутников Terra и Aqua, запущенных NASA для изучения Земли [18]. Регистрация излучения осуществляется в 36 спектральных диапазонах: от видимого до инфракрасного (0,4–14,4 мкм). Это позволяет получать данные о распределении облаков, температуре, влажности, концентрации озона и мелких аэрозольных частиц в атмосфере. Пространственное разрешение от 250 м до 1 км в зависимости от спектрального диапазона. Одномоментно в поле зрения прибора попадает полоса шириной 2330 км, что обеспечивает глобальный охват поверхности Земли каждые 1–2 дня. MODIS обладает высокой радиометрической чувствительностью для точного определения различных характеристик облаков и поверхности Земли. Данные измерений этого инструмента используются для мониторинга состояния атмосферы, океанов, суши и льдов, изучения процессов изменения климата, стихийных бедствий (пожары, пыльные бури и др.), а также для решения ряда научных и прикладных задач. Указанный спектрометрический радиометр обладает высокими эксплуатационными характеристиками и вносит значительный вклад в развитие современных исследований Земли из космоса. Благодаря высокой чувствительности и широкому спектральному охвату, данные MODIS играют ключевую роль в мониторинге многих процессов в системе Земля. Для координат Томска они могут быть получены 1–2 раза в дневное время и столько же раз в ночное. Для совместного анализа с результатами лидарных экспериментов использовались наборы данных уровня обработки 1В (MOD021KM/MYD021KM), содержащие информацию о зарегистрированном радиометром излучении с пространственным разрешением  $1 \times 1$  км.

### Комплексный анализ результатов зенитного лазерного зондирования ОБЯ с данными надирного спутникового спектрометрического радиометра MODIS

Для апробации использования данных спутникового спектрометрического радиометра и оценки воздействия ОБЯ (включая конденсационные следы самолетов) на отражение лучистой энергии (коротковолновой и длинноволновой) выполнено сопоставление результатов лидарного зондирования с данными MODIS. На рис.1 представлены графики, показывающие изменение значений СПЭЯ по данным всех спектральных каналов MODIS видимого диапазона в зависимости от типа облачности.

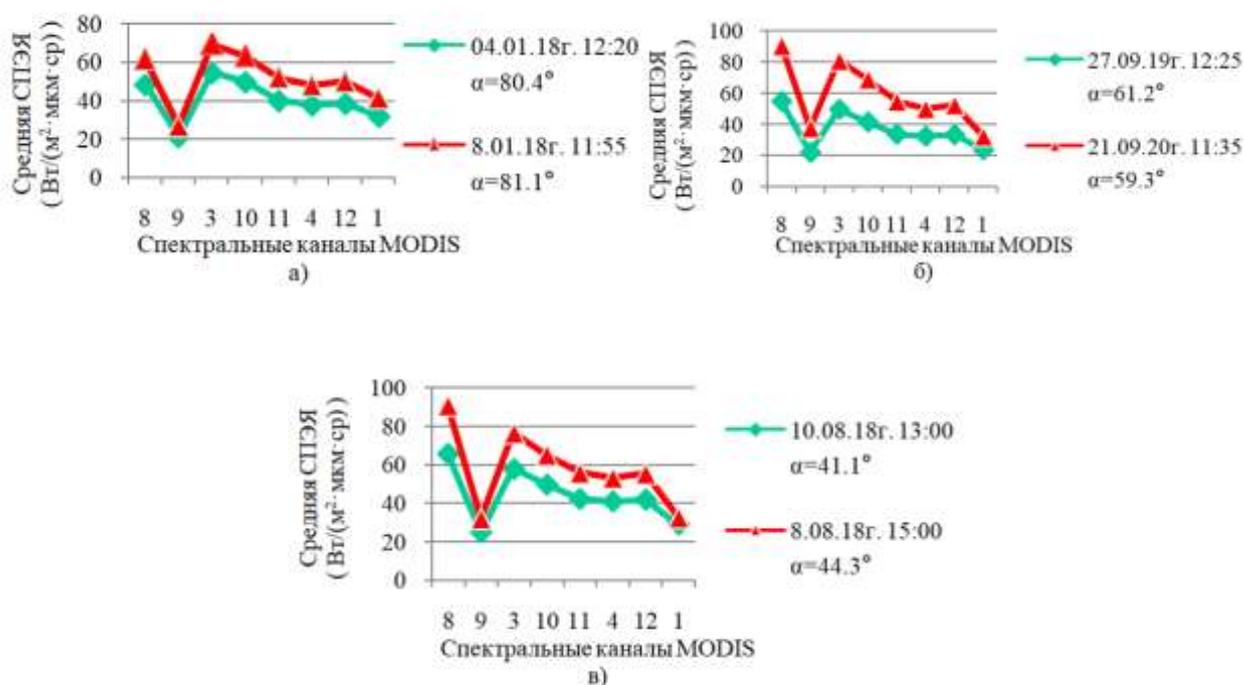


Рис. 1. Сопоставление средней СПЭЯ по всем каналам MODIS видимого диапазона с различными атмосферными условиями; а), б) – самолетные следы, в) – естественное ОВЯ, красная линия – наличие ОВЯ, зеленая линия – безоблачная атмосфера,  $\alpha$  – зенитный угол Солнца

Выбраны 3 эксперимента, в течение которых ВМПЛ регистрировались ОВЯ без облаков нижнего и среднего яруса, и точка стояния лидара попала в поле зрения MODIS (красные линии на графиках). Во всех 3 случаях аэрозольный слой имел зеркальный характер. Это говорит о том, что кристаллы льда в облаках в момент зондирования были ориентированы горизонтально Земной поверхности, соответственно, такой эффект способствует большому отражению лучистой энергии, приходящей в атмосферу. Для каждого эксперимента подобраны данные пролётов MODIS, в течение которых над точкой стояния ВМПЛ была безоблачная атмосфера (зелёные линии). Данные, соответствующие зелёным линиям, подбирались так, чтобы зенитное положение Солнца было наиболее близким к тому, что было во время лидарных измерений. Из графиков видно, что при появлении ОВЯ сигнал во всех спектральных каналах MODIS видимого диапазона выше, чем при безоблачной атмосфере. Это показывает, что значительная часть излучения Солнца отражается, не доходя до поверхности Земли. Согласно полученным данным, вклад в отражение лучистой энергии ОВЯ естественного и искусственного происхождения составляет от 28 до 63%.

Для автоматизации комплексного активно-пассивного исследования ОВЯ и расширения массива обработанных данных было разработано программное обеспечение, связывающее характеристики ОВЯ по данным зенитного лидарного зондирования с данными надирного исследования спутником MODIS. В таблице 1 представлены примеры обработанных программой значений спектральной плотности энергетической яркости отражённого излучения по данным MODIS для координат лидара во время около- и послеполуденных пролётов спутников Aqua и Terra, а также соответствующие характеристики самолетных следов по данным лидарных измерений.

Таблица 1. Сопоставление спектральной плотности энергетической яркости по данным MODIS с данными лидарных исследований ОВЯ

Дата и время лидарных измерений / измерений MODIS	СПЭЯ отражённого излучения (Вт/(м <sup>2</sup> ·мкм·ср)) по данным MODIS для точки стояния лидара НИ ТГУ (в ближайшем пикселе)								Лидарные данные		
	Номер спектрального канала										
	8	9	3	10	11	4	12	1			
	Спектральный диапазон (мкм)										
	0,405–0,420	0,438–0,448	0,459–0,479	0,483–0,493	0,526–0,536	0,545–0,565	0,546–0,556	0,620–0,670	$\tau$	$R$	$m_{44}$
31.05.2021г. 13:55– 14:12 / 13:50	71	24,2	65,9	58	53	52	53,2	37,7	0,13	16,78	0,68
1.06.2021 г. 14:34– 14:51 / 14:35	90	30,5	82,9	73,6	66,1	63,6	66,1	46,8	0,13	23,40	0,92
26.10.2022г. 12:13– 12:29 / 12:10	58,3	27,7	59	52,6	43	41,8	42,3	33,6	0,08	6,17	0,66
26.10.2022г. 13:55– 14:11 / 13:50	56,5	19,9	56,4	50,4	42,9	40,8	41,7	33,3	0,13	2,28	0,39
6.02.2023г. 13:10– 13:27 / 13:10	99,5	38,4	110,4	100,1	84,3	80,2	72,2	68,9	0,17	7,39	0,86

В таблице 1  $\tau$  – оптическая толщина,  $R$  – отношение рассеяния,  $m_{44}$  – элемент МОРС. Из таблицы следует, облака с преимущественной горизонтальной ориентацией ледяных частиц (критерий [12]: отношение рассеяния  $R \geq 10$ , оптическая толщина  $\tau \leq 1$  и элемент МОРС  $m_{44} \leq -0,4$ ) отражают существенно больше Солнечной энергии по сравнению с облаками, в которых ориентация частиц льда незначительна.

### Выводы

Для комплексного анализа данных дистанционного зондирования перистых облаков матричным поляризационным лидаром (с поверхности Земли) и спутниковым спектрометрическим MODIS (из Космоса) разработано программное обеспечение (ПО), которое позволяет:

1. Автоматизировать поиск и загрузку данных MODIS, соответствующих времени, дате и координатам проводимым лидарным экспериментам.
2. Синхронизировать и сопоставлять характеристики ОВЯ, восстановленные по лидарным данным, с вертикальными профилями метеопараметров реанализа ERA 5 и СПЭЯ по данным MODIS.
3. Вести накопление и хранение обработанного массива скомбинированных лидарных и спутниковых данных.

В частности, применение разработанного ПО позволило провести комплексную обработку данных лидарного и пассивного спутникового зондирования ОВЯ. Предварительные оценки показывают, что ОВЯ вносят значительный вклад в отражение потока Солнечной энергии. При этом, ОВЯ естественного и искусственного происхождения

с преимущественной горизонтальной ориентацией частиц льда отражают существенно больше Солнечной энергии по сравнению с облаками, в которых ориентация частиц льда незначительна.

### Список литературы

1. Minnis P. Contrail frequency of occurrence over the U.S. from surface observations / P. Minnis, J.K. Ayers, M.L. Nordeen, et al. // *J. Climate*. – 2003. – V. 16. – Iss. 3. – P.3447–3462.
2. Радиационные свойства перистых облаков [Текст] / Под ред. Е.М. Фейгельсон. – М.: Наука, 1989. – 223 с.
3. Heymsfield A.J. Cirrus Clouds / Heymsfield A.J., Krämer M., Luebke A., et al. // *Meteorological Monographs*. – 2017. – V. 58, doi: 10.1175/amsmonographs-d-16-0010.1.
4. Kärcher B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus / B. Kärcher // *Nature Communications*. – 2018. – V. 9. – 1824, doi: 10.1038/s41467-018-04068-0.
5. Gayet J.F. Microphysical and optical properties of cirrus and contrails: Cloud field study on 13 October 1989 / Gayet J.F., Febvre G., Brogniez G. et al. // *J. Atmos. Sci.* – 1996. – № 53. – P. 126–138.
6. Bock L. The temporal evolution of a long-lived contrail cirrus cluster: Simulations with a global climate model / L. Bock, U. Burkhardt // *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*. – 2016. – P. 3548–3565.
7. Cooper S.J. Performance assessment of a five-channel estimation-based ice cloud retrieval scheme for use over the global oceans / S.J. Cooper, T.S. L’Ecuyer, P. Gabriel, et al // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2007. – 112, D04207.
8. Wang C. Retrieval of ice cloud optical thick nessan defective size us in gafastin frared radiative transfer model / C.Wang, P. Yang, B. Baum et al. // *J. Appl. Meteorol. Clim.* – 2011, 50, P. 2283–2297.
9. Кауль Б.В. Оптико–локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. докт. физ.–мат. наук. – Томск. 2004. – 219 с.
10. Зуев В.Е. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей / В.Е. Зуев, Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов и др. – Н.: Наука. - 1986. - 186 с.
11. Самохвалов И.В. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости / И.В. Самохвалов, Б.В. Кауль, С.В. Насонов и др. // *Оптика атмосферы и океана*. – 2012. – Т. 25.– № 5.– С. 403–411.
12. Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Volkov S.N. Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar / B.V. Kaul, I.V. Samokhvalov, S.N. Volkov // *Appl. Opt.* 2004.- V. 43. - № 36. - P. 6620–6628; doi: 10.1364/AO.43.006620.
13. Брюханов И.Д. Оптические и геометрические характеристики облаков верхнего яруса по данным лазерного поляризационного зондирования 2009–2023 гг. в Томске / И.Д. Брюханов, О.И. Кучинская, Е.В. Ни и др. // *Оптика атмосферы и океана*. - 2024. - Т. 37.- № 2. – С. 105–113.
14. Самохвалов И.В. Программная реализация алгоритма расчета дрейфа конденсационных следов самолетов на высотах образования перистых облаков / И.В. Самохвалов, И.Д. Брюханов, О.Ю. Локтюшин // *Актуальные проблемы радиофизики: VIII Международная научно–практическая конференция, г. Томск 1–4 октября 2019 г.* – 2019. – С. 319–322.
15. Брюханов И.Д. Влияние времени существования конденсационных следов самолетов на их оптические характеристики по данным поляризационного лидара /

- И.Д. Брюханов, О.Ю. Локтюшин // Аэрозоли Сибири. XXVI Конференция Тезисы докладов. – 2020. – С. 71–72.
16. Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Локтюшин О.Ю. Программа расчета параметров дрейфа конденсационных следов самолетов // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664453. – от 7 ноября 2019 г.
  17. ECMWF. [Электронный ресурс]. – URL:<https://www.ecmwf.int> (дата обращения: 20.05.2024).
  18. Guenther, B. On-orbit performance of the Earth Observing System Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; first year of data / B. Guenther, X. Xiong, V.V. Salomonson et al. // Remote Sensing of Environment, 83(1-2), 16-30. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00097-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00097-4).

## JOINT PROCESSING OF THE RESULTS OF LASER POLARIZATION SENSING OF HIGH-LEVEL CLOUDS WITH THE DATA FROM MODIS SATELLITE SPECTRORADIOMETER

*I.V. Samokhvalov<sup>1</sup>, O.Yu. Loktyushin<sup>1</sup>, I.D. Bryukhanov<sup>1,2</sup>, K.N. Pustovalov<sup>1,3</sup>, E.V. Ni<sup>1</sup>, A.A. Doroshkevich<sup>1</sup>, I.V. Zhivotenyuk<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Tomsk State University,

36, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

<sup>2</sup>V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,

1, Academician Zuev Square, Tomsk, 634055, Russian Federation

<sup>3</sup>Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS,

10/3, Academicheskyy Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation

**Abstract.** The article is devoted to the description of the processing technique, its software implementation and evaluation of the results of using joint processing of data from polarization laser sensing of high-level clouds (HLCs) performed with a ground-based lidar with the data on nadir sensing from the satellite spectroradiometer in order to estimate the effect of horizontally oriented ice particles in the HLCs to reflect solar energy

**Keywords:** high-level clouds, aircraft contrails, polarization lidar, backscattering phase matrix, MODIS spectroradiometer.

Статья представлена 03 июня 2024г.