# Сопоставление спутниковых активных и пассивных наблюдений зеркально отражающих слоёв в облаках верхнего яруса

## А.В. Скороходов, А.В. Коношонкин

#### Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия E-mails: vazime@yandex.ru, sasha\_tvo@iao.ru

Представлены результаты сопоставления спутниковых активных и пассивных наблюдений зеркально отражающих слоёв в облаках верхнего яруса. При этом использовались данные дистанционного зондирования CALIOP (спутник CALIPSO) за 2006 и 2007 гг., полученные при угле отклонения лидара от надира 0,3°, а также тематические продукты MODIS (спутник Aqua). Найдены пороговые значения коэффициентов отражения и эффективной излучательной способности облаков, разделяющие их на две группы, в первой из которых кристаллы льда расположены хаотически, а во второй — преимущественно ориентированы в горизонтальной плоскости. Определена преобладающая над Томской обл. за рассматриваемый промежуток времени ориентация кристаллических частиц (хаотическая или преимущественно ориентированная) для различных разновидностей облаков верхнего яруса. Обсуждаются результаты и перспективы выделения облаков с зеркально отражающими слоями на полноразмерных спутниковых снимках MODIS.

**Ключевые слова:** облака верхнего яруса, ориентация частиц, солнечная радиация, спутниковые данные, характеристики облачности, CALIPSO, MODIS

Одобрена к печати: 12.04.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-279-287

## Введение

В настоящее время облачность относится к одному из основных факторов неопределённости в происходящих изменениях климата на Земле (Bony et al., 2015). С одной стороны, усиление парникового эффекта, наблюдаемое уже несколько десятилетий, может привести к уменьшению относительной влажности воздуха, а впоследствии — к сокращению количества облаков (Pressel et al., 2019). С другой стороны, глобальное потепление способствует увеличению испаряемости и росту общей облачности (Fowler, Randal, 1996). При этом наибольшая неопределённость свойственна облакам верхнего яруса, которые, например, в средних широтах образуются на высоте 8–12 км, а их безусловная (полная) повторяемость здесь составляет 50 % от числа наблюдения облачности в общем (Матвеев и др., 1986). Они могут удерживать уходящее длинноволновое излучение, что способствует усилению парникового эффекта, а также рассеивают и ослабляют приходящую солнечную радиацию. Согласно современным теориям степень влияния облачности верхнего яруса на климатическую систему зависит от пространственной ориентации кристаллов льда, из которых она состоит (Baum et al., 2014; Konoshonkin et al., 2017). Если плоские грани этих кристаллических частиц преимущественно ориентированы в горизонтальной плоскости, то наблюдается эффект зеркального отражения (удержание уходящего излучения). Если кристаллы льда расположены хаотически в облаке, то происходит многократное переотражение (рассеяние приходящего излучения). Основным методом определения ориентации кристаллических частиц в облаках является лазерное поляризационное зондирование (Кауль, 2004).

Впервые феномен зеркального отражения описан в работе (Platt, 1978). В дальнейшем было установлено, что слои преимущественно ориентированных кристаллов льда имеют вертикальную протяжённость несколько сотен метров, а время их существования колеблется от десятков минут до нескольких часов за счёт гравитационного осаждения при минимальном влиянии турбулентности (Балин и др., 2011; Коношонкин, 2017; Самохвалов и др., 2012). Данные результаты были получены путём использования наземных лидарных систем. Основным недостатком такого подхода является локальность измерений, что существенно ограничивает область его применения. Поэтому в настоящее время предпринимаются попытки выявления характерных признаков и условий, способствующих обнаружению облаков верхнего яруса с зеркально-отражающими слоями над территориями большой протяжённости применением других средств дистанционного зондирования.

В работе (Скороходов и др., 2019) было выполнено сопоставление результатов восстановления характеристик облачности в районе Томска на основе измерений, полученных наземным лидаром «ЛОЗА-С», и спутниковых снимков MODIS (*анел.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Это позволило определить некоторые характерные особенности для групп облаков с различной ориентацией частиц. В частности, были выделены перспективные с точки зрения оценки положения кристаллов льда параметры облачности, восстанавливаемые на основе данных MODIS: коэффициенты отражения р и эффективной излучательной способности є. Однако число рассмотренных в указанном исследовании эпизодов не даёт с уверенностью говорить о возможности их применения для эффективного обнаружения облаков с зеркально отражающими слоями. Для выявления надёжных пороговых значений р и є необходимо привлекать дополнительную информацию. Однако наземное лазерное поляризационное зондирование выполняется различными научными группами обособленно и нерегулярно. Поэтому одним из решений этой проблемы стало использование данных космических лидаров, например CALIOP (англ. Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) (Winker et al., 2009). При этом необходимо учитывать пространственное разрешение сканирования и его периодичность для одной и той же территории. Поэтому целесообразным оказывается выбор в качестве исследуемого региона не отдельно взятого пункта наблюдения, а достаточно большой по площади области для ежедневного её охвата данными лидара и радиометра.

Таким образом, цель настоящей работы — сопоставление результатов спутниковых активных и пассивных наблюдений облаков верхнего яруса с зеркально отражающими слоями над территорией Томской обл. для выявления их характерных особенностей. Данная работа представляет собой логическое продолжение исследований, начатых в публикации (Скороходов и др., 2019).

## Исходные данные

Восстановление характеристик облаков верхнего яруса осуществлялось на основе результатов дистанционного зондирования лидаром CALIOP (спутник CALIPSO, *англ.* Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) и спектрорадиометром MODIS (спутник Aqua). Указанные системы входят в группировку A-train, в которой космические аппараты различного назначения имеют одинаковую солнечно-синхронную орбиту 705 км с углом наклонения 98° и периодом 16 сут. Поэтому время пролётов над одной и той же точкой подстилающей поверхности между CALIPSO и Aqua различается чуть более чем на 2 мин. Это даёт возможность сканировать одни и те же участки облачности за близкое время, считая её смещение и изменение формы незначительными за столь короткий срок (Eastman, Warren, 2013). При этом использовались данные, полученные в дневное время суток над Томской обл. в период с июня 2006 г. по 27 ноября 2007 г., за исключением 7–17 ноября 2006 г. и 21 августа – 7 сентября 2007 г. Такой выбор обусловлен малым углом отклонения лидара от надира — 0,3°, что позволяет более надёжно регистрировать сильное обратное рассеяние, характерное для зеркально отражающих слоёв в облаках. В настоящее время для устранения засветки приёмника используется угол 3,0°.

Двухволновой (532 и 1064 нм) лидар CALIOP имеет вертикальное разрешение 30–60 м, а горизонтальное на поверхности — 333 м. В работе использовались следующие характеристики, восстановленные на основе результатов зондирования атмосферы Земли этим прибором: полное обратное рассеяние на длине волны 532 нм, коэффициент деполяризации, а также информация о фазовом состоянии воды в облаках. Спектрорадиометр MODIS сканирует

земную поверхность в 36 спектральных диапазонах с длинами волн от 0,4 до 14,4 мкм с пространственным разрешением 250, 500 и 1000 м и периодичностью 1–2 снимка в сутки. В данной работе использовался тематический продукт MYD06\_12, содержащий информацию о  $\rho$ и  $\varepsilon$ , а также снимки в видимом диапазоне спектра с пространственным разрешением 250 м (0,62–0,67 мкм). Последние необходимы для визуального дешифрования и определения типа наблюдаемой облачности верхнего яруса: перистых нитевидных облаков (*Ci fib*), перистых плотных (*Ci sp*), перисто-слоистых (*Cs*) и перисто-кучевых (*Cc*) облаков. Спутниковые данные CALIOP и MODIS извлекались с помощью онлайн-сервисов их поиска и загрузки (https://www-calipso.larc.nasa.gov/products; https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov).

На основе записей лидарных сигналов CALIOP были отобраны эпизоды наблюдения облаков верхнего яруса над Томской обл. за рассматриваемый промежуток времени, высота верхней границы которых превышает 8000 м. Из рассмотрения были исключены ситуации, когда регистрировалась облачность, вертикальная протяжённость которой превышает 1000 м. Это необходимо для устранения эпизодов наблюдения конвективных (кучевых и кучево-дождевых) облаков, в том числе и в стадии распада, которые априорно не могут содержать зеркально отражающих слоёв из-за сильной турбулентности (Толмачева, 2015). Общее число удовлетворяющих всем критериям эпизодов составило 85. Для них были найдены соответствующие снимки MODIS и тематические продукты их обработки. Далее результаты наблюдения облачности верхнего яруса обоими системами дистанционного зондирования сопоставлялись согласно методике, представленной в следующем разделе.

#### Методика сопоставления результатов дистанционного зондирования

Сопоставление результатов наблюдения облачности верхнего яруса выполнялось согласно следующей методике:



1. Рассматривались результаты лазерного зондирования атмосферы лидаром CALIOP.

*Рис. 1.* Полное обратное рассеяние и коэффициент деполяризации излучения при регистрации облаков верхнего яруса над Томской обл. при наличии зеркально отражающего слоя (57°26′с.ш., 88°11′в.д.) от 16.05.2007 (*a*, *в*) и при его отсутствии (60°52′с.ш., 81°32′в.д.) от 13.01.2007 (*б*, *г*) соответственно

На основе информации о степени деполяризации излучения  $\delta$ , полном обратном рассеянии  $\beta'_{532}$  и фазовом состоянии воды в облаках проверялось наличие в них зеркально отражающих слоёв для каждого эпизода их наблюдения. Так, если  $\beta'_{532} > 2 \cdot 10^{-2} \text{ кm}^{-1} \cdot \text{сp}^{-1}$ , то при  $\delta < 0,1$  кристаллы льда ориентированы в горизонтальной плоскости, а при  $\delta > 0,3$  — хаотически (Sassen, Benson, 2001). На *рис. 1* (см. с. 281) показаны эпизоды регистрации облаков верхнего яруса над Томской обл. от 16.05.2007 (см. *рис. 1а* и *в*) и 13.01.2007 (см. *рис. 1б* и *г*) с зеркально отражающим слоем ( $\delta = 0,02$ ) и без него ( $\delta = 0,57$ ) соответственно. Из 85 рассматриваемых в данной работе спутниковых сцен преимущественно ориентированые частицы наблюдались в 35 случаях, а расположенные хаотически — в 50.

2. Затем на спутниковых снимках MODIS локализовались участки облачности, соответствующие положению зеркально отражающих слоёв, выделенных на предыдущем шаге. Далее восстанавливались значения  $\rho$  и  $\varepsilon$  для выбранных областей из продукта MYD06\_12 и определялись разновидности облаков верхнего яруса согласно работе (Skorokhodov et al., 2019). На *рис.* 2 представлены фрагменты спутниковых снимков MODIS за рассматриваемые в предыдущем пункте даты с обозначенными целевыми участками. Выделенная на *рис.* 2*a* область интереса соответствует перистым нитевидным облакам, а на *рис.* 2*b* — перистым плотным.



Рис. 2. Фрагменты спутниковых снимков Томской обл. от 16.05.2007 (*a*) и 13.01.2007 (б) с выделенными на них целевыми участками

Следует отметить, что наиболее часто (в 18 эпизодах наблюдения из 35) зеркально отражающий слой регистрировался в облаках *Ci fib*. Возможная причина этого заключается в образовании данного типа облачности преимущественно в переднем крае систем тёплого фронта и фронта окклюзии, характеризуемых медленным поднятием воздушных масс и их адиабатическим охлаждением (Шакина, 2013). Хаотическое расположение частиц в значительной степени (в 27 случаях из 50) характерно для облаков *Ci sp*. Предположительно, это связано с образованием данной разновидности в результате распада облачности вертикального развития, формирование которой сопровождается быстрым подъёмом воздушных масс и их турбулентным перемешиванием (Винниченко и др., 1976). Зарегистрированные в настоящей работе облака *Cs* в равной степени состояли из преимущественно ориентированных и хаотически расположенных частиц. Кроме этого, за рассматриваемый промежуток времени над Томской обл. облачность *Cc* практически отсутствовала, если принимать во внимание только измерения CALIOP.

#### Обсуждение результатов сопоставления характеристик облачности

После обработки всех выборочных данных был проведён анализ полученных результатов восстановления характеристик облачности верхнего яруса по данным MODIS и CALIOP. На *рис. 3* сгруппированы эпизоды наблюдения преимущественно и хаотически ориентированных частиц в облаках в зависимости от значений  $\rho$  и  $\epsilon$ . Зелёным цветом обозначены случаи регистрации зеркально отражающих слоёв, а красным — их отсутствия. На *рис. 3* видно, что прослеживается достаточно чёткая граница между двумя группами облачности. Так, для преимущественно ориентированных частиц  $\rho > 0,15$  и  $\epsilon > 0,5$ . В остальных случаях кристаллы льда расположены в облаках хаотически. Следует отметить, что существуют эпизоды наблюдения зеркально отражающих слоёв и при  $0,1 < \rho < 0,15$ . Однако точное положение границы между двумя группами облачности требует проведения дополнительных исследований.



*Рис. 3.* Значения коэффициентов отражения и эффективной излучательной способности для преимущественно и хаотически ориентированных частиц



*Рис. 4.* Результат выделения облаков верхнего яруса, содержащих зеркально отражающие слои, по спутниковым снимкам Западной Сибири от 16.05.2007 (*a*) и 13.01.2007 (*б*)

Найденные пороговые значения  $\rho$  и  $\varepsilon$  можно использовать для оценки наличия зеркально отражающих слоёв в облаках на полноразмерных спутниковых снимках, что является важным при анализе радиационного баланса Земли. Однако следует учитывать, что эти сведения будут актуальными только для достаточно тонкой перистообразной облачности, поскольку в плотной преимущественно ориентированные частицы могут находиться в различных её частях (Скороходов и др., 2019). На *рис. 4* показаны результаты выделения облаков верхнего яруса с зеркально отражающим слоем в них в районе Томской обл. для примеров из *рис. 1*.

На рис. 4а видно, что зеркально отражающие слои наблюдаются в тонких перистых нитевидных облаках и по краям плотной облачности верхнего яруса. Предположительно, данный феномен связан с тем, что в центре облака происходят какие-то турбулентные процессы, а на его границе уже действует гравитационное осаждение. При этом *рис. 1а* и в также свидетельствуют, что преимущественно ориентированные частицы находятся не во всём объёме поля облачности. Однако для подтверждения этого факта необходимо проводить дополнительные исследования, что можно рассматривать в качестве перспективного направления развития данной работы. На рис. 46 зеркально отражающие слои наблюдаются в основном у перистослоистых облаков. При более детальном анализе указанного изображения видно, что облачная система в районе Томской обл. соответствует тёплому атмосферному фронту согласно информации из публикации (Беспалов и др., 2011). Причём преимущественно ориентированные частицы наблюдаются в передней его части, расположенной в центре снимка, как упоминалось ранее. Очевидно, что на рис. 4 выделены не все участки облачности с зеркально отражающими слоями из-за вертикальной протяжённости облаков. Однако и такие оценки представляют несомненный интерес для решения задач климатологии и метеорологии. Следует учитывать, что пассивные спутниковые измерения актуальны в большей степени для верхней границы облаков. Однако зеркально отражающие слои могут находиться на различных по высоте уровнях облачного поля. Поэтому полученные в настоящей работе результаты можно считать достоверными только для достаточно тонких облаков верхнего яруса.

#### Заключение

Данная работа представляет собой попытку выявления характерных особенностей зеркально отражающих слоёв в облаках верхнего яруса путём сопоставления спутниковых активных (CALIOP) и пассивных (MODIS) наблюдений. Использование последних из них открывает широкие возможности определения ориентации частиц в целых макросистемах облачности. Таким образом, на основе полученных в работе результатов определены пороговые значения р и є, разграничивающие группы облаков, состоящих из преимущественно и хаотически ориентированных кристаллов льда (см. рис. 3). При этом установлено, что над Томской обл. в 2006 и 2007 гг. наиболее часто зеркально отражающие слои наблюдались в перистых нитевидных облаках, а расположенные хаотически частицы — в перистых плотных. Предположительными причинами этого оказываются различные механизмы образования данных типов облачности, связанные с вертикальной составляющей скорости ветра: конвекцией и гравитационным осаждением. Найденные пороговые значения р и є были апробированы на полноразмерных спутниковых снимках MODIS (см. puc. 4). Их использование позволило выделить достаточно однородные участки облачности над обширной территорией, которые предположительно содержат зеркально отражающие слои. Перспективным направлением развития настоящей работы является анализ микроструктуры отдельно взятых полей облачности путём комплексного использования наземных лидарных, самолётных, а также спутниковых активных и пассивных измерений.

Работа в части сопоставления спутниковых активных и пассивных наблюдений облаков верхнего яруса выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 18-77-10035), а в части изучения характеристик облачности над Западной Сибирью — в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

# Литература

- 1. *Балин Ю. С., Кауль Б. В., Коханенко Г. П.* Наблюдения зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 4. С. 293–299.
- 2. Беспалов Д. П., Девяткин А. М., Довгалюк Ю.А., Кондратюк В.И., Кулешов Ю.В., Светлова Т.П., Суворов С.С., Тимофеев В.И. Атлас облаков. СПб.: Изд-во Д'АРТ, 2011. 248 с.
- 3. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 286 с.
- 4. *Кауль Б. В.* Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО РАН, 2004. 219 с.
- 5. *Коношонкин А. В.* Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах при лазерном зондировании: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО РАН, 2017. 43 с.
- 6. *Матвеев Ю.Л., Матвеев Л.Т., Солдатенко С.А.* Глобальное поле облачности. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 279 с.
- 7. *Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Брюханов И.Д.* Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 5. С. 403–411.
- 8. *Скороходов А.В., Насонов С.В., Коношонкин А.В.* Сопоставление спутниковых пассивных и наземных лидарных наблюдений зеркально отражающих слоёв облаков верхнего яруса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 263–271. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-263-271.
- 9. *Толмачева Н. И.* Исследование характеристик турбулентности в облаках и безоблачной атмосфере // Географ. вестн. 2015. Т. 33. № 2. С. 46–55.
- 10. Шакина Н.П. Лекции по динамической метеорологии. М.: ТРИАДА ЛТД, 2013. 160 с.
- Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Bansemer A., Cole B. H., Merrelli A., Schmitt C., Wang C. Ice cloud single-scattering property models with the full phasematrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm // J. Quantative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2014. V. 146. P. 123–139.
- 12. Bony S., Stevens B., Frierson D. M. W., Jakob C., Kageyama M., Pincus R., Shepherd T. G., Sherwood S. C., Siebesma A. P., Sobel A. H., Watanabe M., Webb M.J. Clouds, circulation and climate sensitivity // Nature Geoscience. 2015. V. 8. P. 261–268.
- 13. *Eastman R., Warren S. G.* Diurnal cycles of cumulus, cumulonimbus, stratus, stratocumulus, and fog from surface observations over land and ocean // J. Climate. 2013. V. 27. P. 2386–2404.
- 14. *Fowler L. D., Randall D.A.* Liquid and Ice Cloud Microphysics in the CSU General Circulation Model. Part III: Sensitivity to Modeling Assumptions // J. Climate. 1996. V. 9. P. 561–586.
- Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Okamoto H., Ishimoto H., Grynko Y., Förstner J. Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: From exact numerical methods to physical-optics approximation // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 195. P. 132–140.
- 16. *Platt C. M. R.* Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // J. Applied Meteorology. 1978. V. 17. P. 1220–1224.
- 17. *Pressel K. G., Kaul C. M., Schneider T.* Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming // Nature Geoscience. 2019. V. 12. P. 163–167.
- Sassen K., Benson S. A midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing: II. Microphysical properties derived from lidar depolarization // J. Atmospheric Sciences. 2001. V. 58(15). P. 2103–2112.
- 19. *Skorokhodov A. V., Astafurov V. G., Evsutkin T. V.* Application of statistical models of image texture and physical parameters of clouds for their classification on MODIS satellite images // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2019. V. 55(9). P. 1053–1064.
- Winker D. M., Vaughan M. A., Omar A., Hu Y., Powell K. A. Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2009. V. 26. P. 2310–2323.

# Comparison of satellite active and passive observations of specularly reflecting layers in the high-level clouds

## A.V. Skorokhodov, A.V. Konoshonkin

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634055, Russia E-mails: vazime@yandex.ru, sasha\_tvo@iao.ru

The results of comparing satellite active and passive observations of specularly reflecting layers in the high-level clouds are presented. For this, CALIOP (CALIPSO) remote sensing records for 2006 and 2007 obtained at the off-nadir scan angle 0.3° and MODIS (Aqua) data products are used. The threshold values for the reflection and effective emissivity ratios of the clouds are found dividing them into two groups: a) with randomly located ice crystals; b) with particles predominantly oriented in the horizontal plane. For the study period, the prevailing orientation of crystalline particles (chaotic or predominantly oriented) in various types of high-level clouds over the Tomsk region was determined. The results and prospects of identifying clouds with specularly reflecting layers in full-size MODIS images are discussed.

**Keywords:** high-level clouds, particle orientation, solar radiation, satellite data, cloud characteristics, CALIPSO, MODIS

Accepted: 12.04.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-279-287

## References

- 1. Balin Yu.S., Kaul B.V., Kokhanenko G.P., Observations of specularly reflecting particles and layers in crystalline clouds, *Optika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 24, No. 4, pp. 293–299 (in Russian).
- 2. Bespalov D. P., Devyatkin A. M., Dovgalyuk Yu. A., Kondratyuk V. I., Kuleshov Yu. V., Svetlova T. P., Suvorov S. S., Timofeev V. I., *Atlas oblakov* (Cloud Atlas), Saint Petersburg: D'ART, 2011, 248 p. (in Russian).
- 3. Vinnichenko N. K., Pinus N. Z., Shmeter S. M., Shur G. N., *Turbulentnost' v svobodnoi atmosfere* (Turbulence in a free atmosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976, 286 p. (in Russian).
- 4. Kaul B. V., *Optiko-lokatsionnyi metod polyarizatsionnykh issledovanii anizotropnykh aerozol'nykh sred: Diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Optical-location method for polarization studies of anisotropic aerosol media, Dr. phys.-math. sci. thesis), Tomsk: IAO SB RAS, 2004, 219 p. (in Russian).
- 5. Konoshonkin A.V., *Rasseyanie sveta na atmosfernykh ledyanykh kristallakh pri lazernom zondirovanii: Avtoref. diss. dokt. fiz.-mat. nauk* (Light scattering by atmospheric ice crystals during laser sounding, Ext. abstract Dr. phys.-math. sci. thesis), Tomsk: IAO SB RAS, 2017, 43 p. (in Russian).
- 6. Matveev Yu. L., Matveev L. T., Soldatenko S. A., *Global'noe pole oblachnosti* (Global cloud field), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 279 p. (in Russian).
- 7. Samokhvalov I. V., Kaul B. V., Nasonov S. V., Zhivotenyuk I. V., Bryukhanov I. D., Backscattering matrix of the mirror-reflecting upper-level cloud layers formed by horizontally oriented crystal particles, *Optika atmosfery i okeana*, 2012, Vol. 25, No. 5, pp. 403–411 (in Russian).
- Skorohodov A. V., Nasonov S. V., Konoshonkin A. V., Comparison of passive satellite data with ground-based lidar observations of specularly reflecting layers in high-level clouds, *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 263–271 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-263-271..
- 9. Tolmacheva N.I., Research of characteristics of turbulence in clouds and cloudless atmosphere, *Geograficheskii vestnik*, 2015, Vol. 33, No. 2, pp. 46–55 (in Russian).
- 10. Shakina N. P., *Lektsii po dinamicheskoi meteorologii* (Lectures on dynamic meteorology), Moscow: TRIADA LTD, 2013, 160 p. (in Russian).
- Baum B.A., Yang P., Heymsfield A.J., Bansemer A., Cole B.H., Merrelli A., Schmitt C., Wang C., Ice cloud single-scattering property models with the full phasematrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm, *Quantative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, Vol. 146, pp. 123–139.
- 12. Bony S., Stevens B., Frierson D. M. W., Jakob C., Kageyama M., Pincus R., Shepherd T. G., Sherwood S. C., Siebesma A. P., Sobel A. H., Watanabe M., Webb M. J., Clouds, circulation and climate sensitivity, *Nature Geoscience*, 2015, Vol. 8, pp. 261–268.

- 13. Eastman R., Warren S. G., Diurnal cycles of cumulus, cumulonimbus, stratus, stratocumulus, and fog from surface observations over land and ocean, *J. Climate*, 2013, Vol. 27, pp. 2386–2404.
- 14. Fowler L. D., Randall D.A., Liquid and Ice Cloud Microphysics in the CSU General Circulation Model, Part III: Sensitivity to Modeling Assumptions, *J. Climate*, 1996, Vol. 9, pp. 561–586.
- 15. Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Okamoto H., Ishimoto H., Grynko Y., Förstner J., Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: From exact numerical methods to physical-optics approximation, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, Vol. 195, pp. 132–140.
- 16. Platt C. M. R., Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals, *J. Applied Meteorology*, 1978, Vol. 17, pp. 1220–1224.
- 17. Pressel K. G., Kaul C. M., Schneider T., Possible climate transitions from breakup of stratocumulus decks under greenhouse warming, *Nature Geoscience*, 2019, Vol. 12, pp. 163–167.
- Sassen K., Benson S., A midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote Sensing: II. Microphysical properties derived from lidar depolarization, J. Atmospheric Sciences, 2001, Vol. 58(15), pp. 2103–2112.
- 19. Skorokhodov A. V., Astafurov V. G., Evsutkin T. V., Application of statistical models of image texture and physical parameters of clouds for their classification on MODIS satellite images, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55(9), pp. 1053–1064.
- 20. Winker D. M., Vaughan M. A., Omar A., Hu Y., Powell K. A., Overview of the CALIPSO Mission and CALIOP Data Processing Algorithms, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, Vol. 26, pp. 2310–2323.