

УДК 551.576.11

Статистический анализ характеристик зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса над Западной Сибирью по спутниковым данным MODIS

А.В. Скороходов✉, А.В. Коношонкин*

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

Поступила в редакцию 18.04.2022 г.;
после доработки 12.05.2022 г.;
принята к печати 15.07.2022 г.

Представлены результаты применения алгоритма обнаружения зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса по данным пассивного спутникового зондирования. Рассматривается перистая облачность с оптической толщиной меньше 5 м и высотой верхней границы больше 8300 м, состоящая из преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда, которая наблюдалась над территорией Западной Сибири с 2006 по 2007 г. Описана методика обнаружения зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса и представлен статистический анализ их характеристик по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS. Обсуждаются сезонно-широтные закономерности рассматриваемых параметров облачности над Западной Сибирью. Впервые оценены характерные значения площади, высоты расположения, коэффициента отражения и эффективной излучательной способности зеркально отражающих слоев над различными широтными зонами целевого региона.

Ключевые слова: зеркально отражающие слои, облака верхнего яруса, ориентированные частицы, спутниковые данные, статистические характеристики; specular reflective layer, high-level cloud, oriented particles, satellite data, statistical characteristics.

Введение

Облака верхнего яруса оказывают существенное влияние на состояние климатической системы Земли и затрудняют прогнозирование ее изменений [1–3]. Перистая облачность может удерживать уходящее длинноволновое излучение от подстилающей поверхности, что способствует усилению парникового эффекта, и рассеивать приходящую солнечную радиацию, тем самым ослабляя ее воздействие [4]. Согласно современным гипотезам степень влияния облаков верхнего яруса на климатическую систему Земли определяется пространственной ориентацией кристаллов льда, из которых они состоят [5]. Если плоские грани этих частиц преимущественно выровнены в горизонтальной плоскости, то наблюдается эффект зеркального отражения. Хаотическая ориентация кристаллов льда в облаках вызывает многократное переотражение (рассеяние) поступающего на них излучения. Впервые феномен зеркального отражения облачностью упоминается в [6]. В дальнейшем было установлено, что вертикальная протяженность облачных слоев, состоящих из преимущественно ори-

ентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда, может достигать нескольких сотен метров, а время их существования может колебаться от десятков минут до нескольких часов [7–9]. При этом предполагаемой причиной выравнивания граней этих частиц в горизонтальной плоскости является гравитационное оседание при минимальном влиянии турбулентности [10].

В настоящее время основным методом определения ориентации кристаллов льда в облаках является лазерное поляризационное зондирование наземными лидарными системами [11–13]. Главные недостатки этого подхода — локальность измерений и получение информации только о вертикальной структуре зеркально отражающих слоев. Однако для климатологии несомненный интерес представляют сведения и о горизонтальной протяженности облаков, состоящих из преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда. Эта информация позволит повысить достоверность оценок радиационных эффектов перистой облачности при прогнозировании изменений состояния климатической системы. Более надежные сведения о горизонтальных размерах зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса можно получить на основе результатов сканирования космическим

* Алексей Викторович Скороходов (vazime@yandex.ru);
Александр Владимирович Коношонкин (sasha_tvo@iao.ru).

лидаром CALIOP (спутник CALIPSO) с периодом повторения орбиты 16 сут [14]. Однако выделение перистой облачности, состоящей из преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда, осложняется отклонением указанного прибора от надира на угол 3° с 2007 г. [15]. При этом диаметр пятна сканирования CALIOP составляет 1 км на высотах наблюдения облаков верхнего яруса. Поэтому задача оперативной оценки горизонтальной протяженности зеркально отражающих слоев по-прежнему является актуальной. В настоящее время стали предприниматься попытки идентификации такой перистой облачности на основе данных пассивного спутникового зондирования. В частности, в [16] нами предложен метод для оценки расположения зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса по снимкам спектрорадиометра MODIS (спутник Aqua) и тематическим продуктам его обработки.

Цель настоящей работы – применение методики идентификации зеркально отражающих слоев в перистой облачности по данным пассивного спутникового зондирования, а также статистический анализ их характеристик над отдельно взятым регионом.

Исходные данные

В качестве целевого региона выбрана территория Западной Сибири. Рассматриваются три ее широтные зоны по отдельности: южная ($52\text{--}60^\circ$ с.ш.) (ЮЗ), переходная ($60\text{--}65^\circ$ с.ш.) (ПЗ) и северная ($65\text{--}72^\circ$ с.ш.) (СЗ). Координаты западной границы указанной территории составляют 64° в.д., а восточной – 90° в.д. Среднегодовая повторяемость облаков верхнего яруса над целевым регионом составляет $\sim 50\%$, что является одним из самых высоких показателей на Земле [17]. Этот параметр демонстрирует небольшую межсезонную изменчивость в течение года. В работе используются спутниковые снимки MODIS (Aqua) ($0,62\text{--}0,67$ мкм) и тематические продукты MYD06_L2 с пространственным разрешением 1000 м [18], полученные с 2006 по 2007 г., когда отклонение CALIOP от надира составляло $0,3^\circ$ [19]. При этом рассматриваются только те эпизоды, когда лидаром CALIOP над Западной Сибирью были зарегистрированы зеркально отражающие слои в перистой облачности с оптической толщиной < 5 [16]. Общее количество таких спутниковых сцен наблюдения облаков верхнего яруса, состоящих из преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда, составило 85. Рассматриваются следующие параметры облачности: площадь зеркального слоя (S), высота его верхней границы (h_{CT}), коэффициент отражения (ρ), эффективная излучательная способность (ϵ) и тип облачности ($t = \{Ci\ fib, Ci\ sp, Cs, Cc\}$), где *Ci fib* – обозначение перистых нитевидных облаков согласно стандарту ВМО [20], *Ci sp* – перистых плотных, *Cs* – перисто-слоистых и *Cc* – перисто-кучевых.

Методика обнаружения зеркально отражающих слоев

Основная суть предложенного в [16] метода идентификации зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса по данным пассивного спутникового зондирования заключается в сравнении ρ и ϵ с заранее определенными пороговыми значениями. При этом рассматриваются только те пиксели облачности на изображениях из космоса, в которых $h_{CT} > 8300$ м и оптическая толщина < 5 . Так, если в этих точках $\rho > 0,15$ и $\epsilon > 0,5$, то кристаллы льда считаются преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости. В остальных случаях расположение частиц в пикселе облачности предполагается хаотическим. Следует отметить, что пороговые значения определены с помощью сопоставления результатов наземного лазерного зондирования и спутниковой съемки MODIS, изложенных в [21].

На рис. 1 (цв. вкладка) показан результат выделения зеркально отражающих слоев над целевым регионом по спутниковому снимку MODIS от 28.10.2006 г. (07:45 UTC). Зеленым цветом здесь обозначены области, предположительно принадлежащие облакам верхнего яруса с преимущественной ориентацией кристаллов льда в горизонтальной плоскости, а синим выделена остальная облачность (включая конвективную и перистую) с $h_{CT} > 8300$ м, в том числе с оптической толщиной больше 5. Из рис. 1, б видно, что зеркально отражающие слои могут располагаться как внутри отдельно взятых облаков, так и на их краях. В частности, на широте 55° наблюдаются достаточно большие области, содержащие преимущественно ориентированные в горизонтальной плоскости кристаллы льда внутри перисто-слоистой облачности, а севернее – по краям облаков вертикального развития. Отметим, что зеркально отражающие слои на рис. 1, б представляют собой достаточно однородные участки изображений с горизонтальной протяженностью в несколько сотен километров. С использованием предложенной в [16] методики были обработаны все 85 спутниковых сцен. Результаты статистического анализа особенностей расположения зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса над различными широтными зонами целевого региона, а также их характеристик приведены в следующем разделе.

Обсуждение результатов

Для каждого отдельно взятого поля облачности верхнего яруса размером более 10000 км² (включая крупные конвективные ячейки), содержащего зеркально отражающие слои, вычислялись перечисленные выше параметры, а также определялся тип облачности на основе тематического продукта MYD06_L2. Локализация этих фрагментов облачности на обработанных изображениях из космоса осуществлялась путем выделения их прямоугольной областью вручную. Общее количество выделенных полей облаков, содержащих зеркально отражающие слои, составило 136. На рис. 2 приведены гистограммы

относительных частот, выраженных в процентах, для вышеперечисленных характеристик облачности и каждой из рассматриваемых в работе широтных зон целевого региона. Из рис. 2, *a–в* видно, что зеркально отражающие слои в облаках верхнего яруса имеют площадь менее 17000 км² в 88% эпизодах их наблюдения над СЗ целевого региона, в 81% — над ПЗ и в 76% — ЮЗ. При этом 67% случаев регистрации преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда

в СЗ приходится на перисто-слоистую облачность, а 52 и 64% в ПЗ и ЮЗ соответственно — на перистые нитевидные облака. Следует отметить, что доля перисто-слоистой облачности с зеркально отражающими слоями в ПЗ составляет 34%. Таким образом, наблюдается ярко выраженная широтная зависимость повторяемости эпизодов наблюдения преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда в облачности различных типов над Западной Сибирью. При этом доля площади

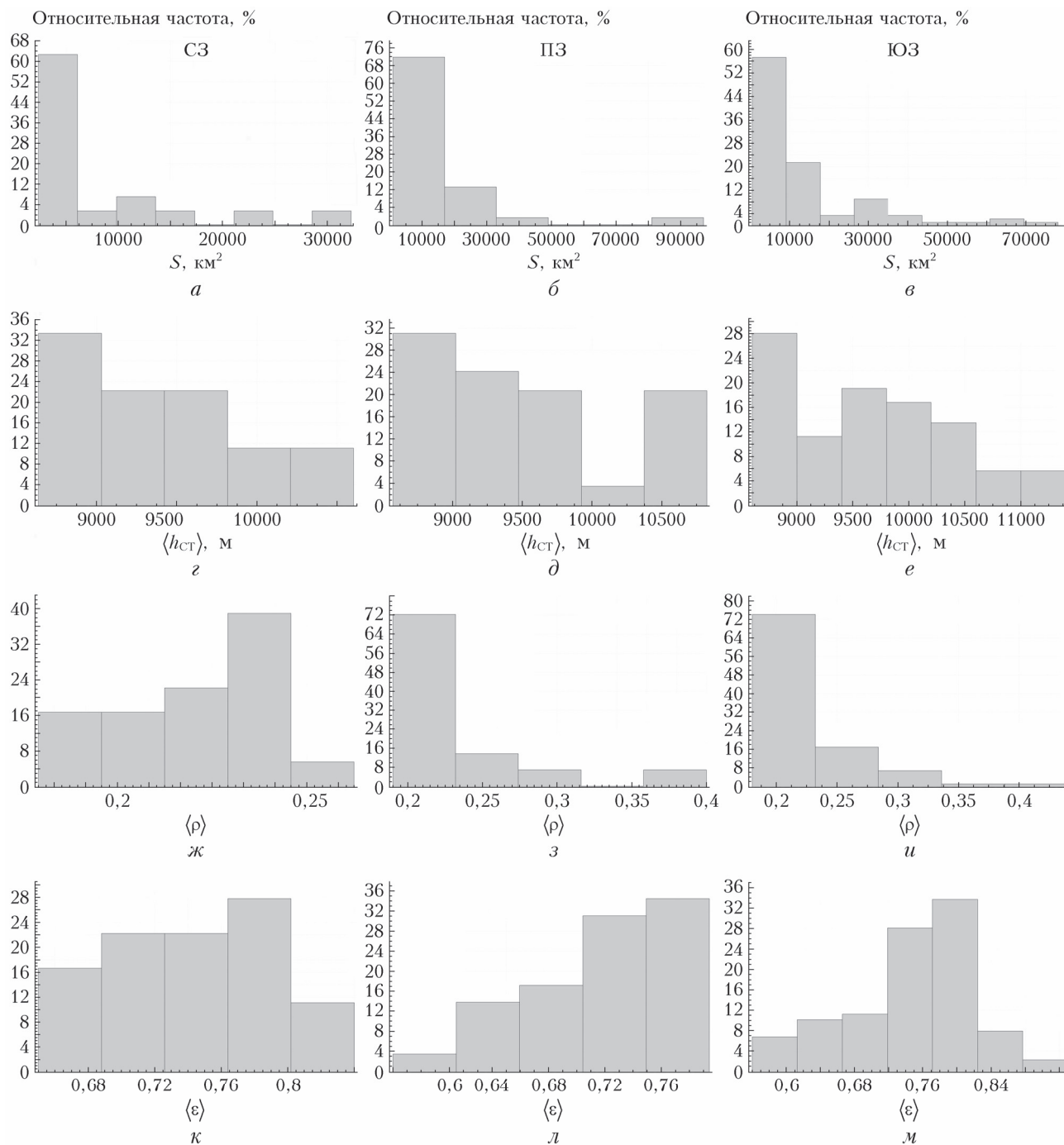


Рис. 2. Гистограммы относительных частот значений площади зеркально отражающих слоев (*a–в*), средних значений высоты верхней границы облаков (*г–е*), коэффициентов отражения (*ж–и*) и эффективной излучательной способности (*к–м*) над исследуемыми зонами Западной Сибири с 2006 по 2007 г.

зеркально отражающих слоев от общего размера исследуемых полей облаков варьируется в зависимости от типа облачности. Так, для конвективных ячеек указанный параметр не превышает 10%, поскольку рассматриваемые кристаллы льда наблюдаются только на ее краях. А в перисто-слоистой облачности доля зеркально отражающих слоев может превышать 50%. Такие результаты хорошо согласуются с известными оценками в этой области [22–24].

Рис. 2, z – e показывает, что наиболее характерные высоты расположения зеркально отражающих слоев во всех рассматриваемых зонах целевого региона не превышают 9200 м. При этом выделяется высокая повторяемость облаков, состоящих из преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда, с $\langle h_{CT} \rangle > 10500$ м над ПЗ по сравнению с остальными зонами. Одной из возможных причин этого является более низкая интенсивность турбулентных потоков на указанных высотах в рассматриваемых широтах Западной Сибири [25].

Из рис. 2, $ж$ – $и$ видно, что у перистой облачности с зеркально отражающими слоями $\langle \rho \rangle < 0,23$ в 56% случаев их наблюдения в СЗ, в 72% – в ПЗ и 73% – в ЮЗ. При этом значения $\langle \rho \rangle > 0,4$ практически не встречаются над Западной Сибирью. Таким образом, перистая облачность, состоящая из преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда, с оптической толщиной < 5 отражает порядка 20% приходящего солнечного излучения в рассматриваемом целевом регионе.

Согласно рис. 2, $к$ – $м$ наиболее характерные значения $\langle \varepsilon \rangle$ для облаков верхнего яруса, содержащих зеркально отражающие слои, находятся в интервале 0,71–0,73 в СЗ; 0,8–0,83 – в ПЗ и 0,77–0,81 – в ЮЗ. В итоге такая перистая облачность более эффективно удерживает уходящее длинноволновое излучение от поверхности земли в ПЗ по сравнению с остальными зонами.

Далее были определены средние значения исследуемых параметров облачности в целом по всей Западной Сибири за весь рассматриваемый в работе период. Так, $S = 13500$ км², $h_{CT} = 9500$ м, $\rho = 0,23$, $\varepsilon = 0,74$, а преобладающий тип – *Ci fib*.

На рис. 3 приведены среднесезонные значения исследуемых параметров облачности и их погрешности для территории Западной Сибири в целом. Зимние месяцы были исключены из рассмотрения по причине низкой повторяемости облаков верхнего яруса, состоящих из преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда. Из рис. 3, a видно, что среднесезонное значение площади зеркально отражающих слоев в летнее время в два раза меньше, чем в весенне-осенний период. При этом характерные высоты верхней границы облаков различаются менее чем на 1000 м в рассматриваемые сезоны года (рис. 3, b). Кроме этого, отражающие свойства зеркального слоя выше в ве-

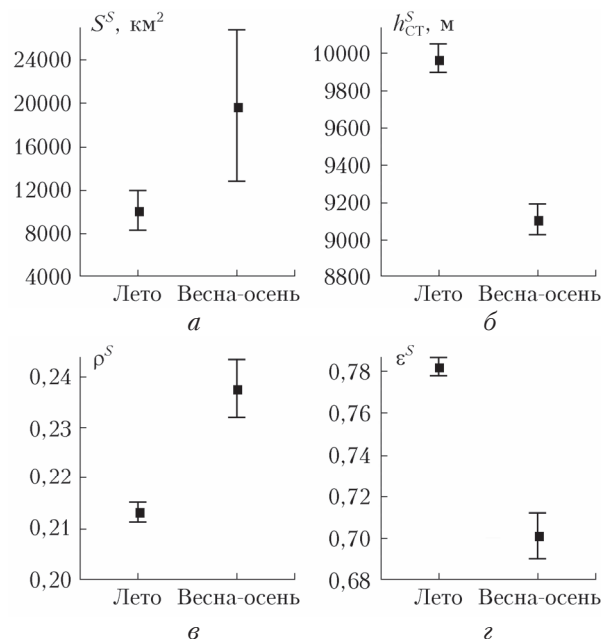


Рис. 3. Среднесезонные значения (S) и стандартные ошибки площади зеркально отражающих слоев (a), высоты верхней границы облаков (b), коэффициента отражения (c) и эффективной излучательной способности (d) над Западной Сибирью с 2006 по 2007 г.

весенне-осенний период, а его способность удерживать уходящее от подстилающей поверхности длинноволновое излучение – в летний (рис. 3, c и d).

Заключение

Предложенный в [16] алгоритм обнаружения зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса апробирован на спутниковых данных MODIS, полученных над территорией Западной Сибири в период с 2006 по 2007 г. Выполнен статистический анализ характеристик полей облачности, состоящих из преимущественно ориентированных в горизонтальной плоскости кристаллов льда и имеющих оптическую толщину меньше 5, над различными широтными зонами целевого региона. На основе его результатов установлено, что в 80% случаев площадь зеркально отражающих слоев над Западной Сибирью не превышала 17000 км². При этом в СЗ целевого региона преимущественно ориентированные в горизонтальной плоскости кристаллы льда наблюдались в основном в перисто-слоистой облачности, в ПЗ – в перисто-слоистой и перистой нитевидной в пропорции 2:1, а в ЮЗ – в перистой нитевидной. Наиболее характерные высоты расположения зеркально отражающих слоев над всей Западной Сибирью не превышают 9200 м. При этом зарегистрировано значительное число эпизодов с аномально высокими значениями $\langle h_{CT} \rangle$ в переходной зоне. Результаты анализа $\langle \rho \rangle$ и $\langle \varepsilon \rangle$ свидетельствуют о том, что облака верхнего яруса, состоящие из преимущественно ориентированных в горизонтальной

плоскости кристаллов льда, способны отражать порядка 20% приходящего на них оптического излучения и удерживать около 75% длинноволновой радиации над Западной Сибирью. Кроме этого, установлено, что характеристики перистой облачности, содержащие зеркально отражающие слои, имеют ярко выраженные сезонные различия.

Отметим, что определение точных физических механизмов изменений отражательной и излучательной способности облаков на данном этапе исследований невозможно. Однако можно предположить, что, поскольку микрофизические характеристики ледяных кристаллов перистой облачности (шероховатость поверхности и их форма) существенно зависят от метеорологических параметров атмосферы (влажности, температуры, давления и т.д.), колебания ρ^S и ϵ^S тоже обусловлены сезонными изменениями состояния окружающей среды в регионе. Полученная в рамках выполнения настоящей работы информация может быть использована для улучшения понимания обратных связей облаков и решения задач климатологии и метеорологии в рамках целевого региона [26].

Финансирование. Работа в части анализа изменчивости характеристик зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-77-10089, <https://rscf.ru/project/21-77-10089/>), а в части изучения широтных особенностей параметров облачности над Западной Сибирью – в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. *Ceppi P., Brient F., Zelinka M.D., Hartmann D.L.* Cloud feedback mechanisms and their representation in global climate models // *WIREs Clim. Change*. 2017. V. 8. P. e465.
2. *Lohmann U., Neubauer D.* The importance of mixed-phase and ice clouds for climate sensitivity in the global aerosol-climate model ECHAM6-HAM2 // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 8807–8828.
3. *Voigt A., Albern N., Ceppi P., Grise K., Li Y., Medeiros B.* Clouds, radiation, and atmospheric circulation in the present-day climate and under climate change // *WIREs Clim. Change*. 2021. V. 12. P. e694.
4. *Облака и облачная атмосфера. Справочник / под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана.* Л.: Гидрометеониздат, 1989. 647 с.
5. *Baum B.A., Yang P., Heysfield A.J., Bansemir A., Cole B.H., Merrelli A., Schmitt C., Wang C.* Ice cloud single-scattering property models with the full phase matrix at wavelengths from 0.2 to 100 μm // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2014. V. 146. P. 123–139.
6. *Platt C.M.R.* Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // *J. Appl. Meteorol.* 1978. V. 17. P. 1220–1224.
7. *Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П.* Наблюдения зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // *Оптика атмосфер. и океана*. 2011. Т. 24, № 4. С. 293–299.
8. *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 атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 5. С. 403–411.
9. *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. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2017. V. 195. P. 132–140.
10. *Кауль Б.В., Самохвалов И.В.* Ориентация частиц кристаллических облаков Ci: Часть 1. Ориентация при падении // *Оптика атмосфер. и океана*. 2005. Т. 18, № 11. С. 963–967.
11. *Sassen K.* The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1991. V. 72, N 12. P. 1848–1866.
12. *Kokhanenko G.P., Balin Y.S., Klemasheva M.G., Nasonov S.V., Novoselov M.M., Penner I.E., Samoilo-va S.V.* Scanning polarization lidar LOSA-M3: Opportunity for research of crystalline particle orientation in the clouds of upper layers // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13, N 3. P. 1113–1127.
13. *Neely R.R., Hayman M., Stillwell R., Thayer J.P., Hardesty R.M., O'Neill M., Shupe M.D., Alvarez C.* Polarization lidar at Summit, Greenland, for the detection of cloud phase and particle orientation // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2013. V. 30, N 8. P. 1635–1655.
14. *Winker D.M., Vaughan M.A., Omar A., Hu Y., Powell K.A.* Overview of the CALIPSO mission and CALIOP data processing algorithms // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2009. V. 26. P. 2310–2323.
15. *Sassen K., Kayetha V.K., Zhu J.* Ice cloud depolarization for nadir and off-nadir CALIPSO measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. P. L20805.
16. *Скорыходов А.В., Коношонкин А.В.* Сопоставление спутниковых активных и пассивных наблюдений зеркально отражающих слоев в облаках верхнего яруса // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 3. С. 279–287.
17. *Матвеев Ю.Л., Матвеев Л.Т., Солдатенко С.А.* Глобальное поле облачности. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 279 с.
18. *Ackerman S.A., Frey R., Heidinger A., Li Y., Walther A., Platnick S., Meyer K.G., Wind G., Amarasinghe N., Wang C., Marchant B., Holz R., Dutcher S., Hubbanks P.* EOS MODIS and SNPP VIIRS Cloud Properties: User Guide for the Climate Data Record Continuity Level-2 Cloud Top and Optical Properties Product (CLDPROP). Greenbelt, USA: NASA, 2019. 65 p.
19. *Avery M.A., Ryan R.A., Getzewich B.J., Vaughan M.A., Winker D.M., Hu Y., Garnier A., Pelon J., Verharpen C.A.* CALIOP V4 cloud thermodynamic phase assignment and the impact of near-nadir viewing angles // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 4539–4563.
20. *KH-01 SYNOP.* Код для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета / под ред. Н.П. Фахрутдинова. М.: Гидрометцентр России, 2013. 79 с.
21. *Скорыходов А.В., Насонов С.В., Коношонкин А.В.* Сопоставление спутниковых пассивных и наземных лидарных наблюдений зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 6. С. 263–271.
22. *Noel V., Chepfer H.* A global view of horizontally oriented crystals in ice clouds from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. D00H23.

23. Zhou C., Yang P., Dessler A.E., Liang F. Statistical properties of horizontally oriented plates in optically thick clouds from satellite observations // *Geosci. Remote Sens. Lett.* 2013. V. 10. P. 986–990.
24. Kikuchi M., Okamoto H., Sato K. A climatological view of horizontal ice plates in clouds: Findings from nadir and off-nadir CALIPSO observations // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126. P. e2020JD033562.
25. Переведенцев Ю.П., Мохов И.И., Елисеев А.В. Теория общей циркуляции атмосферы: учебное пособие / под ред. Э.П. Наумова. Казань: Казан. ун-т, 2013. 224 с.
26. 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 // *Nat. Geosci.* 2015. V. 8. P. 261–268.

A.V. Skorokhodov, A.V. Konoshonkin. Statistical analysis for parameters of specularly reflective layers in high-level clouds over Western Siberia based on MODIS data.

The approbation results for the algorithm of detecting specularly reflecting layers in high-level clouds based on passive satellite data are presented. We consider cirrus clouds with an optical thickness of less than 5 and a top height of more than 8300 m consisting of horizontally oriented ice crystals, observed over the territory of Western Siberia from 2006 to 2007. The technique for detecting specularly reflecting layers in high-level clouds is described and the statistical analysis of their parameters is performed on the basis of spectroradiometer MODIS satellite data. We discuss the seasonal and latitudinal properties of the parameters of considered clouds over Western Siberia. The typical values of the area, top height, reflection ratio, and effective emissivity of specularly reflecting layers over different latitudinal zones of the target region were estimated for the first time.

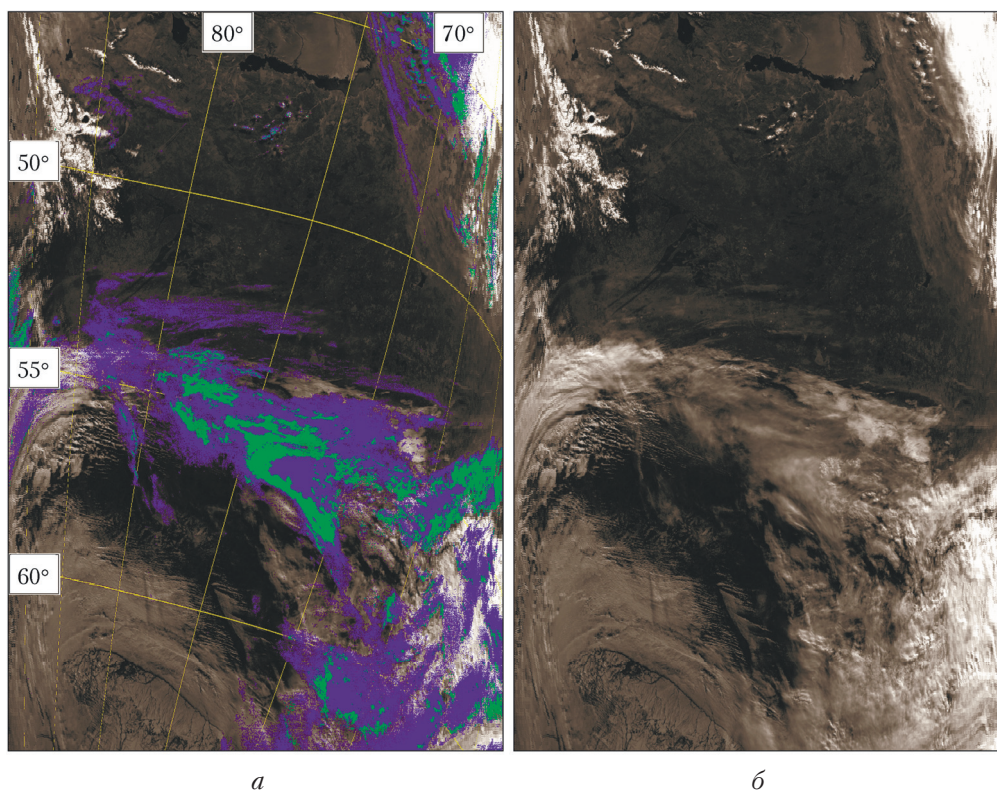


Рис. 1. Результат идентификации зеркально отражающих слоев (зеленый цвет) в облаках верхнего яруса (синий цвет) (а) на спутниковом снимке территории Западной Сибири от 28.10.2006 г. (б)