
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**КРАТКОСРОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СТРУКТУРЫ ПОЛЕЙ
ОДНОСЛОЙНОЙ ОБЛАЧНОСТИ НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ MODIS И VIIRS**

© 2022 г. А. В. Скороходов^а, *, В. Г. Астафуров^а

^а*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск, Россия*

^{*}*E-mail: vazime@yandex.ru*

Поступила в редакцию 08.07.2022 г.

Предложена методика анализа краткосрочной изменчивости структуры облачных полей и их характеристик по ночным и дневным спутниковым данным MODIS и VIIRS. Данный подход заключается в использовании детализированных результатов классификации облачности на последовательных дневных и ночных изображениях из космоса отдельно взятого региона планеты. Предложенная методика позволяет не только определять тип трансформации облаков (преобразование одной разновидности в другую), но и получать количественные оценки изменения параметров облачности при этом. Обсуждаются результаты апробации данного подхода на примере спутниковых данных для Западной Сибири в период с 2017 по 2020 год с октября по март. Установлены наиболее повторяющиеся виды облачных трансформаций за рассматриваемый интервал времени и определены основные причины этих преобразований. Приведены результаты оценки достоверности классификации облачности по ночным снимкам VIIRS в сравнении с данными наземных метеостанций региона.

Ключевые слова: Западная Сибирь, классификация облачности, краткосрочная изменчивость, параметры облачности, трансформация облаков, MODIS, VIIRS

DOI: 10.31857/S0205961422060112

ВВЕДЕНИЕ

Облачность является одним из основных объектов исследований в климатологии и метеорологии. Облака принимают непосредственное участие в таких процессах, как гидрологический цикл, радиационный теплообмен, транспорт аэрозоля и разрушение озонового слоя (Ramanaathan et al., 1989; Stubenrauch et al., 2013; Martin et al., 2017; Tritscher et al., 2021). Структура облачных полей является неоднородной. Облачность непрерывно образуется, перемещается, видоизменяется и исчезает под воздействием различных процессов, происходящих в атмосфере Земли. Согласно действующему метеорологическому стандарту ВМО облака делятся на 27 разновидностей, включая 10 основных форм, их подтипы и некоторые сочетания (КН-01 SYNOP, 2013). Поэтому информация об изменчивости структуры облачных полей и их характеристик как над отдельными регионами, так и всей планетой в целом необходима при решении таких задач, как численный прогноз погоды, обеспечение безопасности полетов воздушных судов, моделирование климата и других.

Интерес представляет краткосрочная, сезонная и многолетняя изменчивость структуры об-

лачных полей и их характеристик. В настоящее время наиболее изученными являются долгосрочные изменения параметров общей и нижней облачности по спутниковым данным и повторяемость основных форм облаков над различными регионами планеты по результатам наземных наблюдений (Чернокульский, Мохов, 2009; King et al., 2013; Комаров и др. 2015). Оценка краткосрочной изменчивости структуры облачных полей и их характеристик, включая суточную и часовую, является более трудоемкой процедурой как в глобальном, так и региональном масштабе. Однако такие сведения необходимы не только для составления прогнозов погоды, но и улучшения понимания механизмов образования облаков, например, быстроразвивающихся конвективных ячеек (Wing, 2019).

Традиционным способом получения информации о краткосрочной изменчивости структуры облачных полей и их характеристик является использование результатов 3-х часовых наблюдений на сети наземных метеостанций (Cairns, 1995; Eastman, Warren, 2014, Yin, Porporato, 2017). Основным недостатком указанного подхода является отсутствие полной информации о полях облачности (например, их горизонтальных размерах)

по причине низкой плотности метеорологических постов, особенно в высоких широтах и труднодоступных местах, а также низкая достоверность таких данных в ночное время суток (Руководство..., 2018). В частности это не позволяет надежно и оперативно осуществлять наблюдение за перемещением даже небольших облачных образований, например, отдельно взятых ячеек мезомасштабных конвективных систем, с целью изучения процессов эволюции их формы и изменчивости их характеристик.

Более эффективным подходом к оценке краткосрочных изменений параметров облачности является использование результатов геостационарной спутниковой съемки с периодичностью 10–30 мин (Shang et al., 2018). Однако в ночное время суток ее возможности по анализу структуры облачных полей сильно ограничены из-за отсутствия информации в видимом диапазоне спектра. При этом известно, что преобразования некоторых типов облачности (например, кучево-дождевой и слоисто-кучевой) происходит именно после захода Солнца за счет ослабления нагрева подстилающей поверхности (Рыбакова, 2020). Кроме этого, результаты геостационарной съемки ухудшаются с увеличением угла визирования по мере удаления от надира, что приводит к размытию текстуры облаков на краях изображений и снижению достоверности восстановленных оценок их характеристик (Escrig et al., 2013).

Перечисленные выше проблемы в области изучения краткосрочной изменчивости параметров облачности требуют разработки новых методов и подходов к их решению. Одним из возможных способов анализа изменений формы облаков и их характеристик, включая ночное время суток, является использование данных радиометра VIIRS, установленного на борту спутников Suomi-NPP и NOAA-20. Отличительной особенностью данного прибора является возможность получения так называемых day/night band (DNB) изображений в видимом диапазоне спектра (0.5–0.9 мкм) на фоне плохой освещенности подстилающей поверхности. При благоприятных условиях съемки полученные DNB-снимки аналогичны дневным спутниковым сценам, на которых отчетливо прослеживается текстура облачности, что позволяет использовать данные VIIRS для оценки краткосрочной изменчивости структуры отдельно взятых массивов облаков и их характеристик.

В данной работе рассмотрена методика оценки краткосрочной изменчивости структуры облачных образований и их характеристик по спутниковым данным MODIS и VIIRS с привлечением информации наземных метеостанций и результаты ее апробации для территории Западной Сибири (ЗС), ограниченной 50–70° с.ш. и 70–90° в.д.

Полученные результаты являются логическим продолжением и дополнением исследований полей общей и нижней облачности в указанном регионе, приведенных в работах (Комаров и др., 2014; Комаров и др. 2015; Астафуров и др, 2021; Астафуров и др, 2021).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Источником информации об облаках в наших исследованиях являлись результаты дистанционного зондирования сенсорами MODIS (спутник Aqua) и VIIRS (спутник Suomi-NPP) (Ackerman et al., 2019). Время пересечения ими экватора в рассматриваемом часовом поясе совпадает и составляет 13:30 (здесь и далее по тексту используется местное время Томской области – UTC+7), что обеспечивает получение близких по времени изображений целевого региона. Это облегчает идентификацию исследуемых полей облачности на ночных снимках MODIS, полученных по данным измерений в тепловом ИК-диапазоне спектра, используя DNB-снимки VIIRS. Указанные сенсоры позволяют охватывать практически всю территорию целевого региона 2–4 раза в сутки при углах отклонения от надира $\pm 40^\circ$, исключая из рассмотрения искаженные края изображений, составляющие около 30% полосы обзора (Barnes et al., 1998). Результаты классификации облачности по спутниковым снимкам сопоставлялись с архивными данными метеостанций целевого региона, которые включают информацию о форме облаков и высоте их нижней границы.

В работе использовались спутниковые данные, полученные за период с 2017 по 2020 год: дневные изображения MODIS (0.62–0.67 мкм) и VIIRS (0.6–0.8 мкм) с пространственным разрешением 250 и 375 м соответственно, ночные снимки MODIS (3.66–3.84 мкм) и VIIRS (0.5–0.9 мкм) с пространственным разрешением 1000 и 750 м соответственно, продукты MYD06_L2, CLDPROP_L2 (VIIRS) и CLDPROP_L2 (MODIS), содержащие информацию о характеристиках облаков, а также файлы геопривязки MYD03 и VNP03. Качество DNB-изображений зависит от условий съемки, с учетом которых и формировались комплекты спутниковых данных. В (Скорухов, 2020) установлено, что при зенитных углах Луны больше 75° и освещенности ее диска меньше 72% текстуры облачности и подстилающей поверхности над ЗС становятся неразличимы. Поэтому отбор спутниковых данных, пригодных для анализа краткосрочной изменчивости структуры облачных полей, осуществлялся исходя из наличия благоприятных для этого условий съемки. Отметим, что хорошая освещенность небосвода в ночное время суток обеспечивает также и более высокую достоверность наземных метеонаблюдений за облаками. Перечисленным выше условиям съем-

ки удовлетворяет до 12 DNB-изображений в месяц в зависимости от продолжительности светового дня и положения линии солнечного терминатора на них. При этом засвеченные Солнцем более чем наполовину ночные спутниковые снимки не использовались. Исходя из этого, в работе рассматривался сезон с октября по март.

Для исследований на дневных снимках MODIS и VIIRS в ручном режиме выбирались достаточно крупные образования облаков исходя из значений соответствующего флага в продукте MYD06_L2. Далее на ночных изображениях из космоса путем визуального осмотра осуществлялся поиск этих же облачных массивов. При этом для отслеживания траектории их перемещения в течение исследуемого интервала времени (с 12–14 ч дня до 3–5 ночи следующих суток) привлекались данные Terra и NOAA-20, а также информация о скорости и направлении ветра, получаемая в результате аэрологического зондирования на некоторых метеостанциях целевого региона. Следует отметить, что в ночное время суток флаг многослойности в продукте MYD06_L2 не определен. Поэтому решение о наличии/отсутствии облаков нескольких ярусов одновременно принималось на основе экспертной оценки. Так, одним из критериев наблюдения на DNB-изображениях однослойной облачности является видимость искусственных источников света от населенных пунктов сквозь нее. Кроме этого, учитывалась информация о перемещении близлежащих к исследуемым образованиям облаков на основе дневных и ночных снимков, которая позволяет оценить возможность их перекрытия. Поскольку выбирались достаточно крупные облачные массивы, то за рассматриваемый промежуток времени (13 ч) многослойность могла возникнуть только при натекании образований облаков разных ярусов друг на друга из-за отличающихся скоростей ветра на высотах их расположения. Исключением являются быстроразвивающиеся конвективные ячейки, которые над целевым регионом в рассматриваемый сезон года практически не регистрируются (Мазин, Хргиан, 1989). Поэтому, если расстояние между исследуемым образованием облаков и другими крупными облачными массивами на DNB-изображениях сокращалось до 100 км и менее по сравнению с их расположением на дневных снимках, то такие спутниковые сцены отбраковывались. Общее количество выборочных данных за период с 2017 по 2020 год, удовлетворяющих указанным выше условиям, составило 235 комплектов продуктов MODIS и VIIRS, состав которых перечислен выше.

В работе рассматривались следующие характеристики облаков, которые восстанавливаются в дневное и ночное время суток по данным обоих приборов одинаковыми алгоритмами (так назы-

ваемые continuous data): высота $h_{\text{ВГ}}$, давление $p_{\text{ВГ}}$ и температура $T_{\text{ВГ}}$ верхней границы и их эффективная излучательная способность в диапазоне 11 мкм ϵ (Ackerman, 2019). Однако для классификации облачности на дневных спутниковых снимках MODIS и VIIRS применялись и другие ее характеристики, содержащиеся в продуктах CLDPROP_L2. При проведении исследований использовалась объединенная классификация облачности, предложенная нами в (Скороходов и др., 2018; Скороходов, 2020), которая приведена в табл. 1. Основное отличие дневной и ночной классификации облачности заключается в слиянии высокослоистой A_s и слоисто-дождевой облачности N_s в один класс A_s-N_s из-за отсутствия информации о водозапасе в темное время суток и совпадающих значений высот их верхних границ, лежащих в интервале 2–7 км, а также перистослоистых C_s и перисто-кучевых облаков C_c в класс C_s-C_c вследствие сходства текстур их изображений на спутниковых снимках MODIS и VIIRS с пространственным разрешением 1000 и 750 м соответственно.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Методика анализа краткосрочной изменчивости структуры отдельно взятых облачных образований и их характеристик заключается в сопоставлении результатов распознавания типов облаков на дневных и ночных спутниковых снимках MODIS и VIIRS. При этом используются разработанные нами ранее алгоритмы классификации облачности по спутниковым данным обоих приборов, полученных в различное время суток и сезоны года (Скороходов и др., 2018; Скороходов А.В., 2020). Указанные методы позволяют распознавать приведенные в табл. 1 разновидности облаков со средней вероятностью 0.85, что является одним из самых высоких показателей достоверности в данной области (Tarakis et al., 2013). Основными этапами анализа краткосрочной изменчивости структуры отдельно взятых облачных образований и их характеристик являются:

1) Выполнение процедуры распознавания типов облаков разработанными нами ранее алгоритмами на основе каждого сформированного комплекта спутниковых данных MODIS и VIIRS;

2) выделение прямоугольной областью крупных (более 10000 км²) однослойных облачных образований, принадлежащих одному типу и находящихся в границах целевого региона на обработанных изображениях MODIS и VIIRS. Описание процедуры поиска одних и тех же массивов облаков на разновременных спутниковых снимках изложено в предыдущем разделе данной работы;

3) определение дневных и ночных средних значений высоты $\langle (h_{\text{ВГ}})_d \rangle_i$ и $\langle (h_{\text{ВГ}})_n \rangle_i$, давления

Таблица 1. Используемая в работе объединенная классификация облачности

Разновидности облаков	День	Ночь
<i>Облака вертикального развития</i>		
Кучевые плоские (<i>Cu hum</i>)	+	+
Кучевые средние и мощные (<i>Cu med/cong</i>)	+	+
Кучево-дождевые лысые (<i>Cb calv</i>)	+	+
Кучево-дождевые волосатые (<i>Cb cap</i>)	+	+
<i>Облака нижнего яруса</i>		
Слоисто-кучевые кучевообразные (<i>Sc cuf</i>)	+	+
Слоисто-кучевые волнистообразные (<i>Sc und</i>)	+	+
Слоистые (<i>St</i>)	+	+
Слоисто-дождевые (<i>Ns</i>)	+	
<i>Облака среднего яруса</i>		
Высокослоистые (<i>As</i>)	+	{As–Ns}
Высококучевые кучевообразные (<i>Ac cuf</i>)	+	+
Высококучевые волнистообразные (<i>Ac und</i>)	+	+
<i>Облака верхнего яруса</i>		
Перистые нитевидные (<i>Ci fib</i>)	+	+
Перистые плотные (<i>Ci sp</i>)	+	+
Перисто-слоистые (<i>Cs</i>)	+	
Перисто-кучевые (<i>Cc</i>)	+	Cs–Cc

$\langle\langle p_{\text{ВГ}} \rangle\rangle_{d,i}$ и $\langle\langle p_{\text{ВГ}} \rangle\rangle_{n,i}$, температуры $\langle\langle T_{\text{ВГ}} \rangle\rangle_{d,i}$ и $\langle\langle T_{\text{ВГ}} \rangle\rangle_{n,i}$ верхней границы выделенных облачных образований, а также их эффективной излучательной способности $\langle\epsilon_d\rangle_i$ и $\langle\epsilon_n\rangle_i$ соответственно. Вычисление этих характеристик осуществляется путем усреднения по всем облачным пикселям, попавшим в прямоугольные области на дневных и ночных изображениях из космоса, выделенных на этапе 2 для i -го комплекта $i = 1, 2, \dots, 235$;

4) нахождение оценок краткосрочной изменчивости рассматриваемых характеристик облаков и установление фактов их трансформации (преобразования из одной разновидности в другую) за интервал времени между дневной и ночной спутниковой съемки MODIS и VIIRS. Так, для высоты верхней границы облачности:

$$\Delta_i(h_{\text{ВГ}}) = \left| \langle\langle h_{\text{ВГ}} \rangle\rangle_{d,i} - \langle\langle h_{\text{ВГ}} \rangle\rangle_{n,i} \right|.$$

Оценки $\Delta_i(p_{\text{ВГ}})$, $\Delta_i(T_{\text{ВГ}})$ и $\Delta_i(\epsilon)$ определяются аналогично. При этом факт трансформации облаков устанавливается на основе анализа результатов классификации облачности, полученных на этапе 1. Рассматриваемые наборы данных группируются по виду наблюдаемых преобразований облаков;

5) для каждой группы g_k , сформированной на этапе 4, рассчитываются средние значения оценок краткосрочной изменчивости характеристик облачности $\langle\Delta_i(h_{\text{ВГ}})\rangle_{g_k}$, $\langle\Delta_i(p_{\text{ВГ}})\rangle_{g_k}$, $\langle\Delta_i(T_{\text{ВГ}})\rangle_{g_k}$ и $\langle\Delta_i(\epsilon)\rangle_{g_k}$.

На рис. 1 показан пример распознавания разновидностей облаков на дневном (MODIS) и ночном (VIIRS) спутниковых снимках целевого региона от 16.09.2019 г. и 17.09.2019 г. соответственно с разницей около 13 часов. Зеленой окружностью здесь выделен один и тот же массив конвективной облачности. Несмотря на то, что повторяемость облаков вертикального развития в рассматриваемый сезон с октября по март низкая (Мазин, Хргиан, 1989), именно эта разновидность позволяет наиболее наглядно рассмотреть краткосрочную изменчивость структуры отдельно взятых облачных образований. Результаты классификации свидетельствуют о том, что в светлое время суток над территорией Томской области исследуемый массив облаков, находящийся в хвосте окклюдирующего холодного фронта, соответствовал типу *Cu med/cong* (рис. 1, б), а в ночное развился до *Cb calv* (рис. 1, г). Все это хорошо согласуется с данными наземных наблюдений до наступления темного времени суток: в 16:00 на ближайшей к рассматриваемому полю облачно-

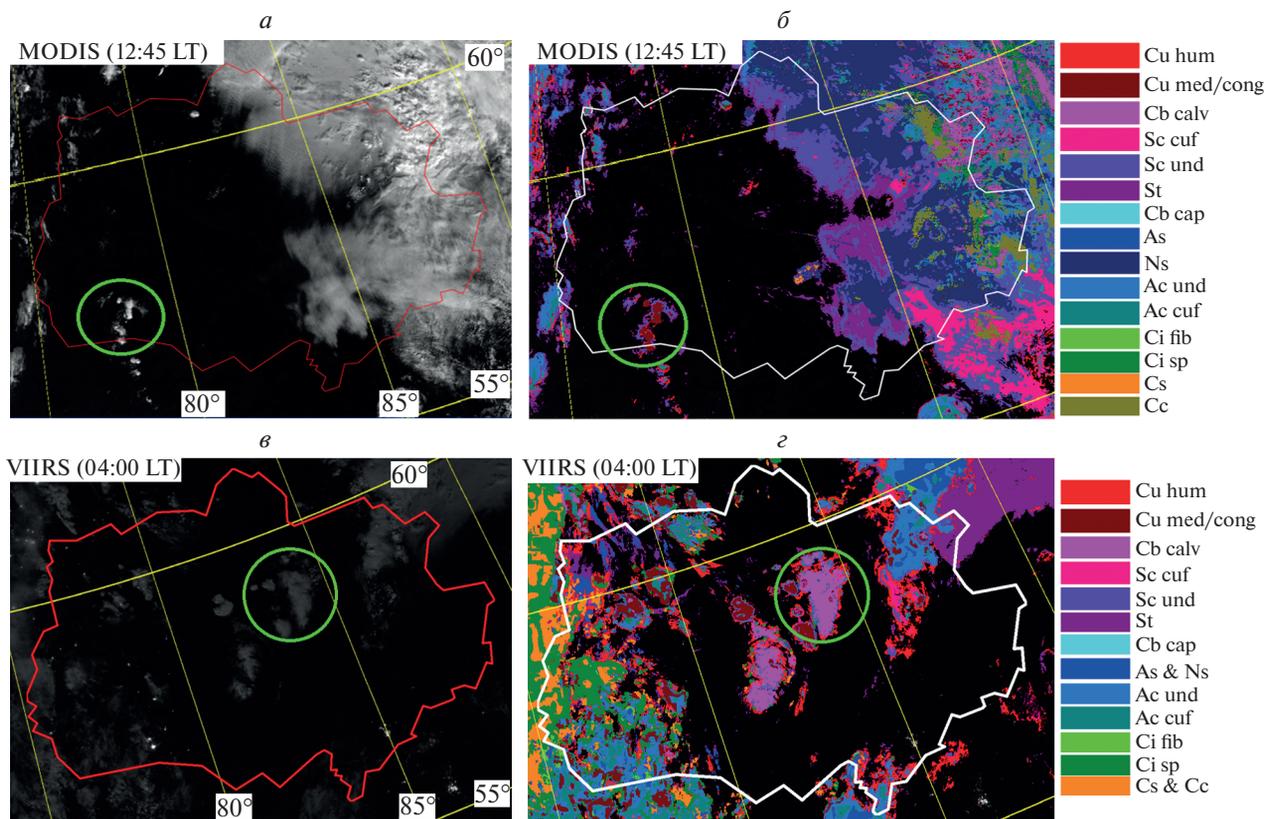


Рис. 1. Результаты классификации облачности и локализации отдельно взятого массива конвективных облаков (б, д) на спутниковых снимках MODIS (а) от 16.09.2019 г. и VIIRS (в) от 17.09.2019 г. целевого региона в районе Томской области.

сти метеостанции (Пудино) была зарегистрирована облачность *Cu med/cong*, на следующих постах наблюдения по пути его предположительного перемещения в 19:00 (Старица) – *Cb calv*, в 22:00 (Парабель) – *Cb cap*, а в 01:00 (Березовка) и 04:00 (Ванжиль-Кынак) – чистое небо. Разногласия в двух последних случаях можно объяснить удаленностью метеостанций от рассматриваемого облачного образования, которое составило более 50 км. Для рассматриваемого эпизода трансформации массива облаков $\Delta(h_{BG}) = 400$ м, $\Delta(p_{BG}) = 30$ гПа, $\Delta(T_{BG}) = 3$ К и $\Delta(\epsilon) = 0$. Более подробно сопоставление результатов классификации облачности по спутниковым снимкам с данными метеостанций обсуждается в следующем разделе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 2 приведены результаты оценки краткосрочной изменчивости структуры однослойных облачных образований и их характеристик после обработки всех 235 комплектов спутниковых данных MODIS и VIIRS. В первом столбце таблицы указаны виды наблюдаемых преобразований облаков из одной разновидности в другую

от начала наблюдения (днем) и до его окончания (ночью), а в последнем N_k – число эпизодов наблюдения таких трансформаций. Здесь индекс $k = 1, 2, \dots, 11$ определяет вид преобразования однослойной облачности. Следует отметить, что в табл. 2 приведены только наиболее повторяющиеся виды трансформаций структуры облачных образований. Общее число эпизодов зарегистрированных преобразований однослойной облачности составило $\sum N_k = 103$ из 235 рассмотренных наборов данных. В остальных случаях разнообразность облаков, наблюдаемая на дневном и ночном снимках, совпадала.

Из табл. 2 видно, что преобразования облаков $As-Ns \rightarrow Cs-Cc$ и наоборот являются наиболее повторяющимися. Анализируя факторы образования отдельных типов облачности по (Мазин, Хргиан, 1989; Беспалов и др., 2013; Рыбакова, 2020), можно сделать вывод о том, что данные трансформации характерны при эволюции теплых и холодных (1-го рода) атмосферных фронтов. На втором месте по повторяемости расположено преобразование $Ci sp \rightarrow Cs-Cc$. Основным механизмом этой трансформации является растекание вершин облачности *Cb cap* под тропопа-

Таблица 2. Наиболее повторяющиеся виды трансформации облаков над ЗС за период между дневной и ночной спутниковой съемками с октября по март

k	Вид	$\langle \Delta(h_{\text{ВГ}}) \rangle_{g_k}$, м	$\langle \Delta(p_{\text{ВГ}}) \rangle_{g_k}$, гПа	$\langle \Delta(T_{\text{ВГ}}) \rangle_{g_k}$, К	$\langle \Delta(\epsilon) \rangle_{g_k}$	N_k
Наблюдается изменение яруса облаков						
1	$As-Ns \rightarrow Cs-Cc$	4357	315	29	0.48	30
2	$Cs-Cc \rightarrow As-Ns$	4549	328	29	0.34	26
3	$Ac\ cuf \rightarrow Sc\ cuf$	1173	130	7	0.03	9
Ярус облаков остается неизменным						
4	$Ci\ sp \rightarrow Cs-Cc$	879	47	5	0.15	15
5	$As-Ns \rightarrow Ac\ cuf$	264	29	2	0.02	7

узой с последующим гравитационным оседанием. На третьем месте находится преобразование $Ac\ cuf \rightarrow Sc\ cuf$. Данная трансформация предположительно связана с ослабеванием конвективных процессов в ночное время, способствующее понижению яруса облачности. Последнее преобразование $As-Ns \rightarrow Ac\ cuf$ обусловлено эволюцией окклюдирующих и холодных (2-го рода) атмосферных фронтов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что с октября по март над ЗС краткосрочная трансформация однослойных облачных образований преимущественно связана с эволюцией атмосферных фронтов различных типов, а не ослабеванием нагрева подстилающей поверхности к концу светового дня.

Из табл. 2 видно, что трансформации облаков, в которых они меняют ярус, сопровождаются более существенной изменчивостью их характеристик по сравнению с преобразованиями облачности, наблюдаемых в пределах одного яруса. Отметим, что высокие значения $\langle \Delta(\epsilon) \rangle_{g_1} = 0.48$ и $\langle \Delta(\epsilon) \rangle_{g_2} = 0.34$ в табл. 2 обусловлены фазовыми переходами облачных частиц (из жидкого состояния в кристаллы льда и наоборот). При этом для преобразования $Ci\ sp \rightarrow Cs-Cc$ величину $\langle \Delta(\epsilon) \rangle_{g_4} = 0.15$ можно объяснить тем, что первый из этих типов облачности образуется вследствие замерзания крупных капель облаков $Cb\ cap$, которые затем уменьшаются в размерах при их таянии из-за гравитационного оседания (Мазин, Хргиан, 1989).

В работе проведен сравнительный анализ результатов классификации (РК) облачности по спутниковым снимкам VIIRS с данными метеостанций (ДМ) целевого региона, полученных в ночное время суток, с целью оценки надежности предложенной нами методики. Для каждого из 235 эпизодов наблюдения однослойных облачных образований учитывались одновременные

данные трех метеостанций, расположенных под ними. В табл. 3 приведены результаты анализа. Здесь n_i – число эпизодов, описанных в первом столбце, v – их относительная повторяемость по группам, обозначенным в последнем столбце, “НО(l)” – свидетельствует о том, что на l метеостанциях регистрировались облака более низкого яруса по отношению к “мнению” классификатора облачности по спутниковым данным, а “ДМ(l)” – обозначает количество метеостанций, с которыми совпали/не совпали РК. Анализируя табл. 3, можно сделать вывод о том, что в 72% рассматриваемых эпизодов РК хорошо согласуются с ДМ, в 15% – результат неопределенный, а в 13% – результаты распознавания разновидностей облаков в целом не совпадают. Однако в последнем случае наблюдаются достаточно противоречивые эпизоды классификации облачности.

На рис. 2 показаны фрагменты спутниковых снимков полей однослойной облачности, попавших в число эпизодов “Несовпадающая классификация” из табл. 3. В 04:00 06.12.2020 г. на метеостанциях в Парабели, Каргаске и Колпашеве были зарегистрированы облака $Cb\ cap$. Визуальное дешифрирование фрагмента спутникового снимка, полученного в 04:36 (рис. 2, б), свидетельствует об отсутствии указанного типа облачности над территорией Томской области и наличии оптически тонкой слоистообразной облачности, что совпадает с “мнением классификатора” ($As-Ns$). Таким образом, наблюдается ярко выраженная ошибка наземных метеонаблюдений, поскольку время распада облаков $Cb\ cap$ существенно превышает интервал в 30 мин (Мазин, Хргиан, 1989) между наземными и спутниковыми данными. Другой пример: облака $Cb\ cap$, были зарегистрированы в 04:00 06.10.2020 г. на метеостанциях в Бакчаре, Молчанове и Колпашеве. Однако из рис. 2, г видно, что на фрагменте спутникового снимка VIIRS, сделанного в 03:42, изображены поля однослойной облачности $Sc\ und$ и $As-Ns$.

Таблица 3. Результаты сопоставления РК с ДМ относительно типа наблюдаемой облачности над целевым регионом

Типы эпизодов (число метеостанций)	n_i	v	Примечание
РК совпадают с ДМ (3)	45	0.72	Совпадающая классификация
РК совпадают с ДМ (2) и НО (1)	21		
РК совпадают с ДМ (2) и не совпадают с ДМ (1)	19		
РК совпадают с ДМ (1) и НО (2)	32		
РК совпадают с ДМ (0) и НО (3)	52		
РК совпадают с ДМ (1), не совпадают с ДМ (1) и НО (1)	10	0.15	Наблюдаются разногласия в классификации
РК не совпадают с ДМ (1) и НО (2)	20		
РК не совпадают с ДМ (2) и НО (1)	6		
РК совпадают с ДМ (1) и не совпадают с ДМ (2)	9	0.13	Несовпадающая классификация
РК не совпадают с ДМ (3)	21		

Это подтверждается видимостью искусственных источников света сквозь эти облака (рис. 2, в), что было бы невозможно при наличии оптически плотных облаков *Cb cap*. Помимо приведенных примеров регистрировались случаи разногласия между РК и ДМ при определении типа слоистообразных форм облачности, что предположительно вызвано отсутствием информации о высоте ее нижней границы на метеостанциях в условиях плохой освещенности подстилающей поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика оценки краткосрочной изменчивости структуры однослойных облачных образований и их характеристик по дневным и ночным спутниковым данным MODIS и VIIRS. Основной особенностью данного подхода является использование таких результатов классификации облачности, которые позволяют идентифицировать преобразования не только основных форм облаков, как в работах (Stubenrauch et al., 2006; Eastman, Warren, 2014, Yin, Porporato, 2017), но и их разновидностей в любое время суток. Это расширяет возможности анализа причин краткосрочной изменчивости структуры облачных полей над отдельно взятыми регионами планеты, что может оказаться весьма полезным для составления региональных прогнозов погоды. В частности, нами установлено, что над Западной Сибирью в рассматриваемый период с октября по март атмосферные фронты становились основной причиной быстропотекающих трансформаций однослойных облачных образований, а не усиление/ослабление интенсивности конвективных процессов в течение суток. При этом найдены характерные изменения

значений параметров облаков при их преобразовании. Так, наибольшая изменчивость характеристик однослойной облачности наблюдается при изменении ее яруса в процессе трансформации, а также вследствие фазовых переходов в ней. Основным ограничением предложенной методики является возможность ее применения только для тех ночных спутниковых снимков VIIRS, которые получены при благоприятном положении Луны относительно исследуемого региона. Поэтому данный подход применим для изучения региональных особенностей краткосрочной трансформации однослойных облачных образований, а не для оперативного мониторинга.

Сопоставление РК с ДМ за ночное время суток показало, что практически в 70% случаев информация о типе наблюдаемой облачности совпала. В остальных эпизодах результаты были противоречивыми (например, отличался ярус слоистообразных форм облаков или регистрировались существенно различающиеся по своим характеристикам разновидности облаков, например, *Cb cap* и *As-Ns*). Детальный анализ таких ситуаций продемонстрировал более высокую достоверность классификации облачности по спутниковым данным VIIRS из-за наличия информации о высоте верхней границы облаков, а также охвата наблюдаемых облачных образований целиком. Поэтому можно утверждать, что более надежным методом определения форм облаков в ночное время при решении различных задач метеорологии является использование DNB-изображений. По крайней мере это утверждение справедливо в тех случаях, когда наблюдается благоприятное положение Луны. В дневное время суток спутниковая информация и данные метеостанций об облаках способны дополнять друг друга, особенно в случаях многослойной облачности.

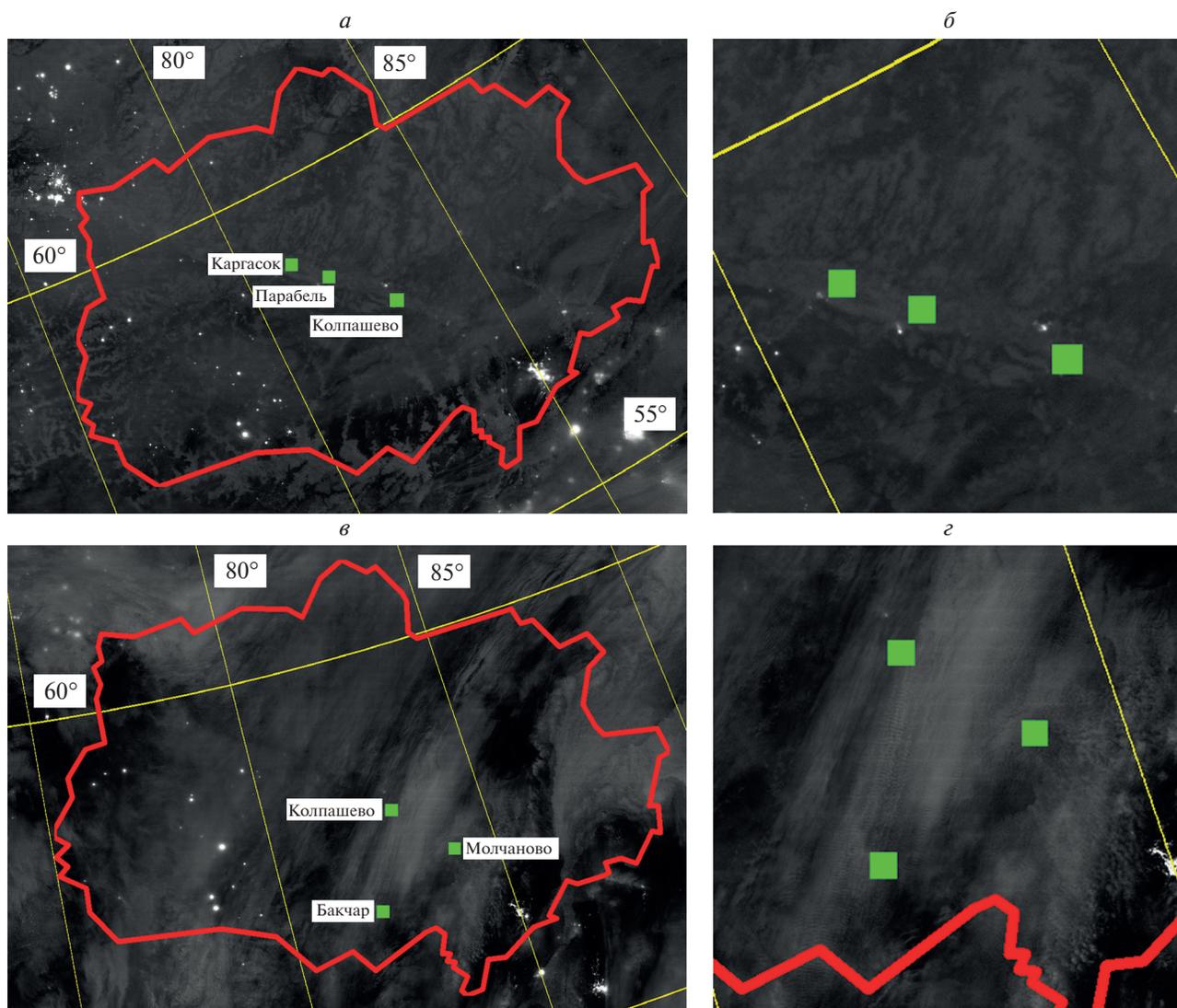


Рис. 2. Уменьшенные фрагменты спутниковых снимков VIIRS целевого региона в районе Томской области от 06.12.2020 г. (04:36) (а) и 06.10.2020 г. (03:42) (в) и участки изображений исследуемого района в реальном масштабе (б) и (г) соответственно.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Курьянович К.В. Исследование многолетних трендов характеристик облачности в летнее время над Западной Сибирью по спутниковым данным // Материалы 19-й Международной конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 15–19 ноября 2021 г. Москва. 2021. С. 148.

Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Курьянович К.В. Статистические модели характеристик облачности над За-

падной Сибирью в летний период по данным MODIS // Метеорология и гидрология. 2021. № 11. С. 20–35.

Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалюк Ю.А., Кондратьев В.И., Кулишов Ю.В., Светлова Т.П., Суворов С.С., Тимофеев В.И. Атлас облаков. СПб.: Изд-во Д’АРТ, 2011. 248 с.

КН-01 SYNOP. Код для оперативной передачи данных приземных метеорологических наблюдений с сети станций Росгидромета / Под ред. Фахрутдинова Н.П. М.: Гидрометцентр России, 2013. 79 с.

Комаров В.С., Нахтигалова Д.П., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я. Климатическое районирование территории Сибири по режиму общей и нижней облачности как основа для построения локальных облачных моделей атмосферы. Часть 1. Методические основы // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 10. С. 895–898.

Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я. Оценка локальных особенностей долговременного из-

- менения облачного покрова над территорией Сибири с использованием результатов ее климатического районирования по режиму общей и нижней облачности // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 1. С. 59–65. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. Мазина И.П., Хргиана А.Х. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
- Руководство по приборам и методам наблюдений. Том V – Обеспечение качества и менеджмент систем наблюдений. Женева: Изд-во ВМО, 2018. 151 с.
- Рыбакова Ж.В. Облака и их трансформация / Под ред. Кужевской И.В. Томск: Издательский дом ТГУ, 2020. 234 с.
- Скоруходов А.В., Астафуров В.Г., Евсюткин Т.В. Применение статистических моделей текстуры изображений и физических параметров облаков для их классификации на спутниковых снимках MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 43–58.
- Скоруходов А.В. Классификация облачности в ночное время суток по спутниковым данным VIIRS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020. Т. 17. № 3. С. 240–251.
- Чернокульский А.В., Мохов И.И. Сравнение современных глобальных климатологий облачности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. № 2. С. 235–243.
- 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.E., Dutcher S., Hubanks 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). USA. Greenbelt, MD: Goddard Space Flight Center, 2019. 65 p.
- Barnes W.L., Pagano T.S., Salomonson V.V. Pre-launch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1 // IEEE T. Geosci. Remote. V. 36. № 20. P. 1088–1100.
- Cairns B. Diurnal variations of cloud from ISCCP data // Atmospheric research. 1995. V. 37. № 1–3. P. 133–146.
- Eastman R., Warren S.G. Diurnal cycles of cumulus, cumulonimbus, stratus, stratocumulus, and fog from surface observations over land and ocean // J. climate. 2014. V. 27. № 6. P. 2386–2404.
- Escrig H. et al. Cloud detection, classification and motion estimation using geostationary satellite imagery for cloud cover forecast // Energy. 2013. V. 55. P. 853–859.
- King M.D., Platnick S., Menzel W.P., Ackerman S.A., Hubanks P.A. Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013. V. 51. P. 3826–3852.
- Martin A.C. et al. Transport of pollution to a remote coastal site during gap flow from California's interior: impacts on aerosol composition, clouds, and radiative balance // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. V. 17. № 2. P. 1491–1509.
- Ramanathan V., Cess R.D., Harrison E.F., Minnis P., Barkstrom B.R., Hartmann D.L. Cloud-radiative forcing and climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment // Science. 1989. V. 243. P. 57–63.
- Shang H. et al. Diurnal cycle and seasonal variation of cloud cover over the Tibetan Plateau as determined from Himawari-8 new-generation geostationary satellite data // Scientific reports. 2018. V. 8. № 1. P. 1–8.
- Stubenrauch C.J., Chédin A., Rädcl G., Scott N.A., Serrar S. Cloud properties and their seasonal and diurnal variability from TOVS Path-B // J. Climate. 2006. V. 19. P. 5531–5553.
- Stubenrauch C.J. et al. Assessment of global cloud datasets from satellites: Project and database initiated by the GEWEX Radiation Panel // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2013. V. 94. P. 1031–1049.
- Tapakis R., Charalambides A.G. Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review // Solar Energy. 2013. V. 95. P. 392–430.
- Tritscher I. et al. Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion // Reviews of geophysics. 2021. V. 59. № 2. P. e2020RG000702.
- Wing A.A. Self-aggregation of deep convection and its implications for climate // Current climate change reports. 2019. V. 5. № 1. P. 1–11.
- Yin J., Porporato A. Diurnal cloud cycle biases in climate models // Nature communications. 2017. V. 8. № 1. P. 1–8.

Short-Term Variability of Single-Layer Cloud Field Structure over Western Siberia from MODIS and VIIRS Satellite Data

A. V. Skorokhodov¹ and V. G. Astafurov¹

¹V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics Siberian branch of RAS, Tomsk, Russia

We propose a methodology for analyzing the short-term variability of cloud field structure and its parameters using night and day satellite data from MODIS and VIIRS. This approach consists in using the detailed results of cloud classification on serial day and night images from space of a single region of the planet. The proposed methodology makes it possible not only to determine the kind of cloud transformation (from one cloud type into another), but to obtain quantitative estimates of changes in cloud features in this case also. We discuss the results of testing this approach using the example of satellite data for Western Siberia from 2017 to 2020 from October to March. The most frequently occurring types of cloud transformations during the time interval under consideration were identified and main causes of this modification were singled out. The results of assessing the reliability of cloud classification using night VIIRS images compared with data from ground-based weather stations in the region are presented.

Keywords: Western Siberia, cloud classification, short-term variability, cloud features, cloud transformation, MODIS, VIIRS

REFERENCES

- Ackerman S.A., Frey R., Heidinger A., Li Y., Walther A., Platnik S., Meyer K.G., Wind G., Amarasinghe N., Wang C., Marchant B., Holz R.E., Dutcher S., Hubanks 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). USA. Greenbelt, MD: Goddard Space Flight Center, 2019. 65 p.
- Astafurov V.G., Skorokhodov A.V., Kur'yanovich K.V.* Issledovanie mnogoletnikh trendov kharakteristik oblachnosti v letnee vremya nad Zapadnoi Sibir'yu po sputnikovym dannym [Study of multiyear trends for cloud features in summer over Western Siberia by satellite data] // Materialy 19-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa". 15–19 noyabrya 2021 g. Moskva. 2021. P. 148. (In Russian).
- Astafurov V.G., Skorokhodov A.V., Kur'yanovich K.V.* Statisticheskie modeli kharakteristik oblachnosti nad Zapadnoi Sibir'yu v letnii period po dannym MODIS [Summer statistical models of cloud parameters over Western Siberia according to MODIS data] // Meteorologiya i gidrologiya. 2021. № 11. P. 20–35. (In Russian).
- Barnes W.L., Pagano T.S., Salomonson V.V.* Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1 // IEEE T. Geosci. Remote. V. 36. № 20. P. 1088–1100.
- Bespalov D.P., Devyatkin A.M., Dovyalyuk Yu.A., Kondratyuk V.I., Kuleshov Yu.V., Svetlova T.P., Suvorov S.S., Timofeev V.I.* Atlas oblakov [Cloud Atlas]. Saint Petersburg: Izd-vo D'ART, 2011. 248 p. (In Russian).
- Cairns B.* Diurnal variations of cloud from ISCCP data // Atmospheric research. 1995. V. 37. № 1–3. P. 133–146.
- Chernokul'skii A.V., Mokhov I.I.* Sravnenie sovremennykh global'nykh klimatologii oblachnosti [Comparison of global cloud climatologies] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2009. V. 6. № 2. P. 235–243. (In Russian).
- Eastman R., Warren S.G.* Diurnal cycles of cumulus, cumulonimbus, stratus, stratocumulus, and fog from surface observations over land and ocean // J. climate. 2014. V. 27. № 6. P. 2386–2404.
- Escrig H. et al.* Cloud detection, classification and motion estimation using geostationary satellite imagery for cloud cover forecast // Energy. 2013. V. 55. P. 853–859.
- King M.D., Platnick S., Menzel W.P., Ackerman S.A., Hubanks P.A.* Spatial and temporal distribution of clouds observed by MODIS onboard the Terra and Aqua satellites // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2013. V. 51. P. 3826–3852.
- KN-01 SYNOP. Kod dlya operativnoi peredachi dannykh prizemnykh meteorologicheskikh nablyudenii s seti stantsii Rosgidrometa [KN-01 SYNOP. Code for operational transmission the data of surface meteorological observations from Roshydromet station network] / Pod red. Fakhruddinova N.P. Moscow: Gidrometsentr Rossii, 2013. 79 p. (In Russian).
- Komarov V.S., Nakhtigalova D.P., Il'in S.N., Lavrinenko A.V., Lomakina N.Ya.* Klimaticheskoe raionirovanie territorii Sibiri po rezhimu obshchei i nizhnei oblachnosti kak osnova dlya postroeniya lokal'nykh oblachnykh modelei atmosfery. Chast' 1. Metodicheskie osnovy [Climatic zoning of the Siberia territory according to the total and lower cloudiness conditions as a basis for construction of local cloud atmosphere models. Part 1. Methodical bases] // Optika atmosfery i okeana. 2014. V. 27. № 10. P. 895–898. (In Russian).
- Komarov V.S., Matvienko G.G., Il'in S.N., Lomakina N.Ya.* Otsenka lokal'nykh osobennosti dolgovremennogo izmeneniya oblachnogo pokrova nad territoriei Sibiri s ispol'zovaniem rezul'tatov ee klimaticheskogo raionirovaniya po rezhimu obshchei i nizhnei oblachnosti [Evaluation of local features of longterm changes in cloud cover over the territory of Siberia from results of climatic zoning according to total and low cloudiness conditions] // Optika atmosfery i okeana. 2015. V. 28. № 1. P. 59–65. (In Russian).
- Martin A.C. et al.* Transport of pollution to a remote coastal site during gap flow from California's interior: impacts on aerosol composition, clouds, and radiative balance // Atmospheric Chemistry and Physics. 2017. V. 17. № 2. P. 1491–1509.
- Oblaka i oblachnaya atmosfera. Spravochnik [Clouds and cloudy atmosphere. Handbook] / Pod red. Mazina I.P., Khrgiana A.Kh. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 647 p. (In Russian).
- Ramanathan V., Cess R.D., Harrison E.F., Minnis P., Barkstrom B.R., Hartmann D.L.* Cloud-radiative forcing and climate: Results from the Earth Radiation Budget Experiment // Science. 1989. V. 243. P. 57–63.
- Rukovodstvo po priboram i metodam nablyudenii. Tom V – Obespechenie kachestva i menedzhment sistem nablyudenii [Handbook on instruments and methods of observation. Volume V – Quality assurance and management of observing systems]. Zheneva: Izd-vo VMO, 2018. 151 p. (In Russian).
- Rybakova Zh.V.* Oblaka i ikh transformatsiya [Clouds and their transformation] / Pod. red. Kuzhevskoi I.V. Tomsk: Izdatel'skii dom TGU, 2020. 234 p. (In Russian).
- Shang H. et al.* Diurnal cycle and seasonal variation of cloud cover over the Tibetan Plateau as determined from Himawari-8 new-generation geostationary satellite data // Scientific reports. 2018. V. 8. № 1. P. 1–8.
- Skorokhodov A.V., Astafurov V.G., Evsyutkin T.V.* Primenenie statisticheskikh modelei tekstury izobrazhenii i fizicheskikh parametrov oblakov dlya ikh klassifikatsii na sputnikovyykh snimkakh MODIS [Application of statistical models of image textures and physical parameters of clouds for their classification on MODIS satellite imagery] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2018. № 4. P. 43–58. (In Russian).
- Skorokhodov A.V.* Klassifikatsiya oblachnosti v nochnoe vremya sutok po sputnikovym dannym VIIRS [Nighttime cloud classification by VIIRS satellite data] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2020. V. 17. № 3. P. 240–251. (In Russian).
- Stubenrauch C.J., Chédin A., Rädcl G., Scott N.A., Serrar S.* Cloud properties and their seasonal and diurnal variability from TOVS Path-B // J. Climate. 2006. V. 19. P. 5531–5553.
- Stubenrauch C.J. et al.* Assessment of global cloud datasets from satellites: Project and database initiated by the GEWEX Radiation Panel // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2013. V. 94. P. 1031–1049.
- Tapakis R., Charalambides A.G.* Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review // Solar Energy. 2013. V. 95. P. 392–430.
- Tritscher I. et al.* Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion // Reviews of geophysics. 2021. V. 59. № 2. P. e2020RG000702.
- Wing A.A.* Self-aggregation of deep convection and its implications for climate // Current climate change reports. 2019. V. 5. № 1. P. 1–11.
- Yin J., Porporato A.* Diurnal cloud cycle biases in climate models // Nature communications. 2017. V. 8. № 1. P. 1–8.