— ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ — ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ЛЕТНИЕ И ЗИМНИЕ АНОМАЛИИ ХАРАКТЕРИСТИК ДНЕВНОЙ И НОЧНОЙ ОБЛАЧНОСТИ НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ MODIS И РЕАНАЛИЗУ ERA5 ЗА ПЕРИОД 2001–2022 гг.

© 2024 г. А. В. Скороходов^{1,} *, К. В. Курьянович¹, В. Г. Астафуров¹

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения РАН, Томск, Россия *E-mail: vazime@yandex.ru Поступила в редакцию 09.11.2023 г.

Представлены результаты анализа многолетней изменчивости характеристик общей облачности (ночной и дневной) над Западной Сибирью в летний и зимний сезон за период 2001-2022 гг. по спутниковым данным MODIS и реанализу ERA5. Рассмотрены три широтные зоны целевого региона: северная (66-72° с.ш., 68-82° в.д.), переходная (60-65° с.ш., 62-88° в.д.) и южная (54-59° с.ш., 62-88° в.д.). Построены временные ряды и на их основе определены тренды следующих параметров облачности: доля покрытия ею исследуемых территорий, высота, давление и температура на ее верхней границе, а также эффективная излучательная способность. Установлено, что в 2010, 2012, 2014 и 2016 годах наблюдалось наибольшее число аномалий во временных рядах перечисленных выше характеристик дневных и ночных облаков. Приведены результаты сопоставления рассматриваемых параметров облачности с изменчивостью температуры подстилающей поверхности и высот геопотенциалов на барических уровнях 500, 700, 850 и 1000 гПа. Обсуждаются гипотезы о причинах возникновения аномальных значений во временных рядах исследуемых характеристик дневных и ночных облаков в летний и зимний сезоны, связанных с особенностями атмосферных циркуляций над Западной Сибирью в различные годы.

Ключевые слова: характеристики облаков, Западная Сибирь, многолетние тренды, спутниковые данные MODIS, реанализ ERA5

DOI: 10.31857/S0205961424030048, EDN: FAYXQD

введение

Облачность, покрывая 60-70% поверхности Земли ежедневно, является одним из основных компонентов ее климатической системы. Облака принимают непосредственное участие в различных процессах системы "атмосфера-океан-суша": гидрологическом цикле, радиационном переносе, транспорте аэрозоля, разрушении озонового слоя и других (Ramanathan et al., 1989; Stubenrauch et al., 2013; Martin et al., 2017; Tritscher et al., 2021). Облачность не статична, она непрерывно образуется, перемещается, видоизменяется и исчезает. Основными механизмами возникновения облаков являются: внутренние волны, конвекция, конвергенция и процессы общей циркуляции атмосферы (например, струйные течения, фронты и циклоны) (Мазин, Хргиан, 1989). Поэтому информация об изменчивости режима облачности и ее параметров за длительный период времени над отдельно взятым регионом планеты может являться маркером смены преобладающих здесь процессов системы "атмосфера-суша-океан" и/или изменения их интенсивности. Особый интерес вызывают ситуации наблюдения аномальных значений во временных рядах исследуемых характеристик и выявление их причин, которыми могут являться различные экстремальные явления. Например, в (Mohr et al., 2019; Chernokulsky et al., 2019) отмечены особенности формирования конвективных облаков при длительном атмосферном блокировании. Таким образом, изучение режима облачности и ее характеристик, а также анализ причин возникновения аномальных значений в их временных рядах над отдельно взятым регионом планеты являются актуальными задачами с точки зрения улучшения понимания механизмов облакообразования.

В настоящее время существует более 10 баз данных, содержащих результаты многолетних наземных и спутниковых наблюдений характеристик преимущественно общей и нижней облачности как в глобальном, так и региональном масштабах, а также большое число работ по их анализу (Schiffer, Rossow, 1983; Чернокульский, Мохов, 2010; Hahn et al., 2012; King et al., 2013; Stubenrauch et al., 2013; Kumar, 2014; Li, Groß, 2022). Применительно к территории Западной Сибири уместно упомянуть исследования Комарова В.С. в качестве примера детального анализа характеристик облаков нижнего яруса (Комаров и др., 2013: 2014: 2015). В большинстве работ по данной тематике рассматриваются карты усредненных за месяц/сезон/год значений параметров общей облачности и/или их временные ряды с выделенными трендами без анализа причин наблюдаемых в них аномалий (Eastman et al., 2011; Heng et al., 2014; Zhao et al., 2020). Более детально режим облачности над отдельно взятыми регионами и его связь с некоторыми процессами системы "атмосфера-сушаокеан" рассмотрен, например, в (Li, Gu, 2006; Su, Jiang, 2013; Matuszko, Węglarczyk, 2018). Следует отметить, что ранее нами уже проводились исследования многолетней изменчивости характеристик различных разновидностей облаков, наблюдаемых над Западной Сибирью летом и зимой по спутниковым данным (Astafurov et al., 2023; Астафуров и др., 2023). Однако эти работы были ограничены изучением только однослойной облачности в дневное время суток без проведения детального анализа причин зарегистрированных аномальных значений во временных рядах ее параметров.

Интерес к Западной Сибири обусловлен в первую очередь ее географическим положением и увеличением повторяемости наблюдения здесь положительных температурных аномалий, а также ростом их максимальных значений за последние десятилетия как зимой, так и летом (Earth Observator, 2023). Западно-Сибирская равнина представляет собой низменную, сильно заболоченную и залесенную территорию. На западе указанный регион граничит с Уральскими горами, на востоке со Среднесибирским плоскогорьем, на севере с Северным Ледовитым океаном, на юге с Казахским мелкосопочником, а на юго-востоке с предгорьями Алтая и Западных Саян (Харюткина, 2019). Перечисленные особенности создают условия для развития ярко выраженного меридионального переноса, усиливающегося в случаях формирования обширных блокирующих антициклонов над Европейской частью России или возникновением в зимний период сезонного центра действия атмосферы – Сибирского максимума (Мохов и др., 2020). Поэтому для Западной Сибири характерны значительные температурные колебания в течение года, а также продолжительные периоды аномально жаркой или холодной погоды. Можно предположить, что указанные выше факторы влияют и на режим облачности в регионе, а увеличение экстремальности климата здесь за последние десятилетия приводит к его изменению и появлению сезонных аномальных значений характеристик облаков. В частности, в работе (Chernokulsky et al., 2013) отмечена положительная обратная связь между количеством общей облачности и интенсивностью Сибирского максимума.

Целью данной работы является анализ многолетней изменчивости характеристик общей (ночной и дневной) облачности над Западной Сибирью в летний и зимний сезоны по спутниковым данным MODIS за период 2001–2022 гг., а также изучение причин наблюдаемых аномалий в их временных рядах с привлечением данных реанализа ERA5.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Источником информации о характеристиках общей облачности являются результаты зондирования сенсором MODIS, установленного на борту спутника Terra, в дневное и ночное время за летний (июнь, июль, август) и зимний (декабрь, январь, февраль) период 2001-2022 гг. Выбор этого прибора обусловлен в первую очередь продолжительным временем его функционирования, а также формируемой на основе его данных облачной маски, считающейся одной из лучших в этой области вследствие возможности съемки в спектральных каналах 7.2 и 14.2 мкм (Jedlovec, 2009). Дневной пролет над Западной Сибирью указанным спутником осуществляется в районе 07:00, а ночной – в 14:00 часов по UTC. Нами использовался продукт MOD08 M3, содержащий среднемесячные значения параметров облачности, полученных из продукта MOD06 L2 усреднением по сетке в 1° (LAADS DAAC, 2003). При этом рассматривались только те параметры облачности, которые одинаково эффективно восстанавливаются как в дневное, так и ночное время суток (т.е. рассчитанные без применения информации видимых каналов MODIS): доля покрытия облачностью (F), высота ее верхней границы (h_{BT}), температура (T_{BT}) и давление на ней (p_{BI}) , а также эффективная излучательная способность (ϵ) на длине волны 11 мкм.

В работе рассматривались отдельно три широтные зоны Западной Сибири для получения более детальных результатов анализа многолетней изменчивости параметров общей облачности над целевым регионом: северная (66-72° с.ш., 68-82° в.д.), переходная (60-65° с.ш., 62-88° в.д.) и южная (54-59° с.ш., 62-88° в.д.). Такое деление обусловлено возможностью корректного сопоставления полученных в работе результатов с данными ежегодных отчетов Росгидромета (где выполнено похожее зонирование), так и оценки влияния на режим облаков здесь таких крупных барических образований как атлантические и полярные циклоны, так и Азорский и Сибирский максимумы.

Помимо ежегодных отчетов Росгидромета для выявления причин наблюдения аномальных значений во временных рядах исследуемых параметров облачности рассматривалась информация о среднемесячной температуре подстилающей поверхности ($T_{\Pi\Pi}$) из продукта MOD021C3 (MODIS Land, 2023), а также сведения о высоте геопотенциала на барических уровнях 500 (z_{500}), 700 (z_{700}), 850 (z_{850}) и 1000 (*z*₁₀₀₀) гПа из реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2020). Использование архивных синоптических карт представляется нам нецелесообразным по причине низкой концентрации метеорологических станций в целевом регионе (особенно в переходной и северной зонах), а, в частности, тех, которые регулярно осуществляют аэрологическое зондирование (University of Wyoming, 2023).

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Методика анализа изменчивости характеристик облаков над Западной Сибирью по спутниковым данным заключается в следующем:

1) Построение временных рядов усредненных за лето (июнь, июль, август) и зиму (декабрь, январь, февраль) значений рассматриваемых в работе характеристик дневной и ночной облачности $\langle F \rangle$, $\langle h_{BT} \rangle$, $\langle T_{BT} \rangle$, $\langle p_{BT} \rangle$ и $\langle \varepsilon \rangle$ над различными широтными зонами Западной Сибири за период 2001-2022 гг. и определение линий тренда.

2) Построение временных рядов усредненных за лето и зиму значений $\langle T_{\Pi\Pi} \rangle$, $\langle z_{500} \rangle$, $\langle z_{700} \rangle$, $\langle z_{850} \rangle$ и $\langle z_{1000} \rangle$ за дневное и ночное время и определение линий тренда по аналогии с пунктом 1.

3) Поиск аномалий во временных рядах рассматриваемых параметров облачности. Под аномалиями здесь и далее понимается существенное отклонение значений конкретной характеристики облаков от линии ее тренда в один и тот же год. Для каждого параметра дневной и ночной облачности отбирается до трех аномалий в зимнее и летнее время. Проводится сопоставление полученных данных с ежегодными отчетами Росгидромета с целью выявления процессов системы "атмосфера—суша—океан", которые могли стать причиной возникновения этих аномалий (например, антициклонов, циклонов, стационарных фронтов). Выполняется анализ временных рядов температуры подстилающей поверхности и высот геопотенциала на различных уровнях.

4) Вычисление значений коэффициентов корреляции как для различных пар рассматриваемых в работе параметров облачности, так и для характеристик облаков с температурой подстилающей поверхности и высотами геопотенциала на каждом уровне отдельно за летний и зимний сезон в дневное и ночное время. Результаты построения временных рядов, выявления в них аномальных значений и поиска причин их появления представлены в следующем разделе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 показаны графики межгодовой изменчивости летних и зимних значений доли покрытия различных широтных зон целевого региона облаками и высоты верхней границы облачности в ночное и дневное время за период 2001-2022 гг. Из рис. 1 видно, что значения $\langle F \rangle$ и $\langle h_{BT} \rangle$ летом в целом описываются нейтральными трендами в переходной и северной зонах Западной Сибири и убывающими — в южной. Для зимы наблюдается более сложная картина. Если для высоты верхней границы ночной и дневной облачности характерен нейтральный тренд (который наиболее ярко выражен в северной зоне) для всей Западной Сибири, то для доли покрытия ночными облаками он положительный во всех зонах, а дневными – нейтральный в переходной и южной. и отрицательный в северной. Интересной особенностью являются большие межгодовые колебания значений $\langle F \rangle$ и $\langle h_{BI} \rangle$ в зимний сезон по сравнению с летним, превышающие 20% и 1000 м соответственно. При этом летом годы наблюдения аномалий во временных рядах доли покрытия облаками и высоты их верхней границы в большинстве своем совпадают для дневного и ночного времени, а зимой имеются различия. Так, максимальные зимние значения $\langle h_{BI} \rangle$ в северной зоне днем зарегистрированы в 2010, а ночью – в 2009 году. Следовательно, анализ причин наблюдения аномалий во временных рядах характеристик ночной и дневной облачности следует проводить по-отдельности. В частности, это позволит рассмотреть солнечную активность в качестве одного из сопутствующих факторов их возникновения (Eastman, Warren, 2014).

В табл. 1 приведены годы наблюдения аномальных значений во временных рядах одновременно у трех и более параметров дневной и ночной облачности в зимний и летний сезон над каждой широтной зоной Западной Сибири. Из таблицы видно, что для лета эти годы в целом совпадают в дневное и ночное время для отдельно взятой территории, а для зимы наблюдаются различия. Выделяется 2010 год, когда было зафиксировано наибольшее число аномалий по всему целевому региону во всех сезонах. Очевидно, летом это связано с уникальными условиями окружающей среды, сложившимися вследствие длительного атмосферного блокирования в Европейской части России (Шакина, Иванова, 2010; Мохов, 2011). Причины возникновения аномальных значений во временных рядах параметров зимней облачности в 2010 году будут рассмотрены далее.



Рис. 1. Временные ряды доли покрытия облаками различных широтных зон Западной Сибири и высоты верхней границы облачности летом (a, b) и зимой (δ , c) в ночное и дневное время.

Таблица 1. Годы наблюдения наибольшего числа аномальных значений во временных рядах параметров ночной и дневной облачности в летний и зимний сезоны над различными широтными зонами Западной Сибири за период 2001–2022 гг.

Зоны	Ле	сто	Зима			
	День	Ночь	День	Ночь		
Северная	2010, 2013, 2016	2010, 2013, 2016	2010, 2018, 2021	2010, 2021		
Переходная	2010, 2014, 2015	2010, 2014, 2015	_	2010		
Южная	2001, 2012, 2014	2012, 2014, 2016	2012	2010		

На рис. 2 показаны графики межгодовой изменчивости летних и зимних значений температуры подстилающей поверхности в различных широтных зонах Западной Сибири в дневное и ночное время суток. А на рис. 3 приведены временные ряды высот геопотенциала днем на барических уровнях 500, 700, 850 и 1000 гПа. Графики ночных значений $\langle z_{500} \rangle$, $\langle z_{700} \rangle$, $\langle z_{850} \rangle$ и $\langle z_{1000} \rangle$ практически совпадают с дневными, и поэтому не были представлены. Из рис. 2 видно, что в Западной Сибири наблюдается рост $\langle T_{nn} \rangle$, что хорошо согласуется с данными, полученными с помощью других средств измерения в (Черенкова, 2016; Ломакина, Лавриненко, 2021). Отметим только более сильные межгодовые колебания значений температуры подстилающей поверхности в зимний сезон по сравнению с летним, которые достигают 10°С.



Рис. 2. Временные ряды дневных и ночных температур подстилающей поверхности летом (*a*) и зимой (*б*) в различных широтных зонах Западной Сибири.

Положительные летние аномалии $< T_{nn} >$ наблюдаются в 2003, 2012, 2013, 2016 и 2021 году хотя бы в одной из рассматриваемых широтных зон преимущественно в дневное время суток, а отрицательные — в 2008 и 2010 году в северной и переходной зонах, а также в 2014 году в северной и в 2015 году в переходной как днем, так и ночью. Сопоставляя рис. 1а и рис. 2а, видно, что годы наблюдения аномально низких значений *<F>* и *<T_{пл}>* в летнее время совпадают по крайней меря для двух из рассматриваемых в работе широтных зон одновременно. Данный факт может быть обусловлен продолжительной антициклонической деятельностью, вследствие которой отсутствие облачности и ветра увеличивает прогрев подстилающей поверхности. Это предположение подтверждается при анализе рис. За, Зв и Зг, где видны высокие значения геопотенциала на всех уровнях в соответствующие годы. Отметим только, что в южной зоне антициклоническая деятельность была выражена менее ярко. Существование длительных антициклонов в годы наблюдения положительных температурных аномалий подтверждается и ежегодными отчетами Росгидромета (Росгидромет, 2013; 2014; 2017; 2022). Так, например, в 2016 году продолжительное влияние восточных гребней Азорского максимума в июне и августе над большей частью Западной Сибири привело здесь к аномалии прямой солнечной радиации за сезон в 70-90% от нормы.

Наблюдение отрицательных аномалий $\langle T_{III} \rangle$ летом сопровождается высокими значениями $\langle F \rangle$ в 2010, 2014, 2015 году. В 2010 году длительное блокирование (55 дней) западного переноса в Европейской части России привело к проникновению холодного арктического воздуха далеко вглубь исследуемой территории и образованию

здесь мощного циклона, что подтверждается наличием барических ложбин на рис. За и Зв, а также отчетом Росгидромета (Росгидромет, 2011). В 2014 и 2015 годах наблюдалась в целом одинаковая ситуация, когда над северной частью Европейской части России и Западной Сибири сформировался глубокий циклонический центр Северного полушария. В 2008 году этот центр был смещен немного восточнее, а в южной и северной широтных зонах сказывалось влияние Азорского и Арктического максимумов (Росгидромет, 2009). Поэтому барические ложбины наиболее ярко выражены в этом году только в переходной зоне, что видно из рис. Зв. Таким образом, в годы наблюдения наибольшего числа летних аномалий во временных рядах характеристик облаков из табл. 1 регистрировалась продолжительная антициклоническая или циклоническая деятельность, что дает основание предполагать о взаимосвязи этих событий. При этом фактор солнечной активности можно исключить из причин возникновения таких аномалий летом, поскольку дневные и ночные характеристики облаков хоть и отличаются по абсолютной величине, но имеют схожие по форме временные ряды, что отчетливо проявляется, например, для <F> в южной и $\langle h_{BI} \rangle$ в северной зонах на рис. 1*а* и рис. 1*в* соответственно.

Положительные зимние аномалии $\langle T_{III} \rangle$ наблюдаются в 2002, 2004, 2008, 2012, 2016 и 2020 годах хотя бы в одной из рассматриваемых широтных как днем, так и ночью, а отрицательные в 2001, 2010, 2014 и 2021 годах. Следует отметить, что тенденция изменения временных рядов температуры подстилающей поверхности в различных широтных зонах является сходной. Сопоставление рис. 1*б*, 1*г*, рис. 2*б* и рис. 3*б*, 3*г*, 3*е* показывает, что

ратуры подстилающей поверхности регистрировалась в 2012 году в северной и переходной зонах на фоне достаточно высоких значений $\langle F \rangle$ (рис. 1*г*)



Рис. 3. Временные ряды дневных высот геопотенциала на уровнях 500, 700, 850 и 1000 гПа в северной, переходной и южной зонах Западной Сибири летом (*a*, *b*, *d*) и зимой (*б*, *e*, *e*) соответственно.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 3 2024

и ярко выраженной здесь антициклонической деятельности, исходя из наличия барического гребня на всех уровнях (рис. 36, 3г, 3е). Однако основной вклад в высокие значения $\langle F \rangle$ и $\langle T_{nn} \rangle$ внесли атлантические циклоны, которые с декабря по середину января 2012 года один за другим проникали на территорию Западной Сибири (Росгидромет, 2013). До южной зоны теплые воздушные массы не доходили, поэтому здесь погоду определял отрог Сибирского максимума, о чем свидетельствуют низкие значения *<F>* и *<T*_{лл}*>*. В 2016 и 2018 годах антициклоническая деятельность также слабо отразилась на значениях рассматриваемых в работе параметров облачности, за исключением северной зоны в ночное время. В 2016 году наблюдаемый антициклон был высотным (не достигая уровня 1000 гПа), и основной вклад в формирование облаков здесь так же, как и в 2012 году, внесло многократное проникновение атлантических циклонов (Росгидромет, 2017). В 2018 году произошло резкое изменение циркуляционных процессов с циклонических в декабре и январе на антициклонические в феврале, которыми и обусловлены высокие значения $\langle z_{500} \rangle$, $\langle z_{700} \rangle$, $\langle z_{850} \rangle$ и $\langle z_{1000} \rangle$ (Росгидромет, 2019).

Наблюдение отрицательных зимних аномалий $< T_{nn} >$ сопровождается низкими значениями < F > в северной и переходной зонах преимущественно в ночное время, когда усиливается радиационное выхолаживание подстилающей поверхности. Сопоставление этих данных со значениями вы-

Таблица 2. Коэффициенты корреляции для рассматриваемых характеристик облаков и параметров окружающей среды (северная зона)

	<h_bi></h_bi>	$< T_{BI} >$	<p_bi></p_bi>	<3>	< <i>F</i> >	< <i>T</i> _{<i>ПЛ</i>} >	< _{Z500} >	< _{Z700} >	< _{Z850} >	< _{Z1000} >		
	Лето (день)											
<h_bf< td=""><td>1</td><td>-0.83</td><td>-0.96</td><td>0.51</td><td>0.64</td><td>-0.36</td><td>-0.47</td><td>-0.54</td><td>-0.57</td><td>-0.58</td></h_bf<>	1	-0.83	-0.96	0.51	0.64	-0.36	-0.47	-0.54	-0.57	-0.58		
$< T_{BI} >$		1	0.92	-0.72	-0.83	0.75	0.83	0.83	0.80	0.70		
<p_br></p_br>			1	-0.66	-0.78	0.55	0.65	0.70	0.72	0.69		
<3>				1	0.97	-0.62	-0.70	-0.65	-0.59	-0.49		
< <i>F</i> >					1	-0.66	-0.75	-0.72	-0.67	-0.57		
< <i>T</i> _{<i>пп</i>} >						1	0.90	0.85	0.77	0.60		
	Лето (ночь)											
<h_bf< td=""><td>1</td><td>-0.83</td><td>-0.96</td><td>0.73</td><td>0.79</td><td>0.08</td><td>-0.50</td><td>-0.58</td><td>-0.63</td><td>-0.64</td></h_bf<>	1	-0.83	-0.96	0.73	0.79	0.08	-0.50	-0.58	-0.63	-0.64		
$< T_{BI} >$		1	0.90	-0.84	-0.83	0.19	0.78	0.77	0.73	0.62		
<p_br></p_br>			1	-0.81	-0.83	0.08	0.68	0.74	0.77	0.74		
<3>				1	0.97	-0.01	-0.71	-0.70	-0.66	-0.57		
< <i>F</i> >					1	0.03	-0.63	-0.62	-0.60	-0.52		
< <i>T</i> _{<i>ПП</i>} >						1	0.54	0.51	0.46	0.39		
					Зима	(день)						
<h_bt></h_bt>	1	-0.36	-0.97	0.09	0.29	-0.07	0.11	0.14	0.16	0.18		
$< T_{BI} >$		1	0.35	0.13	0.19	0.58	0.23	0.05	-0.11	-0.29		
<p_br></p_br>			1	-0.16	-0.33	0.16	0.03	-0.01	-0.04	-0.09		
<3>				1	0.75	-0.18	-0.05	0.00	0.02	0.04		
< <i>F</i> >					1	0.15	0.06	-0.20	-0.31	-0.43		
< <i>T</i> _{<i>ПП</i>} >						1	0.62	0.44	0.23	-0.04		
	Зима (ночь)											
<h_{bi}></h_{bi}>	1	0.14	-0.87	0.10	0.20	0.24	0.17	0.06	-0.03	-0.12		
$< T_{BI} >$		1	0.19	0.81	0.79	0.87	0.47	0.32	0.13	-0.12		
<p_bi></p_bi>			1	0.16	0.06	0.03	-0.01	0.03	0.05	0.05		
<8>				1	0.95	0.80	0.07	-0.12	-0.31	-0.54		
< <i>F</i> >					1	0.89	0.22	0.00	-0.22	-0.09		
< <i>T</i> _{<i>ПП</i>} >						1	0.58	0.40	0.19	-0.09		

сот геопотенциала на рис. 36, 3г, 3е дает основание полагать, что указанные аномалии вызваны в первую очередь антициклонами. Причем в 2001, 2010 и 2021 году эти антициклоны были низкими, не достигая уровня 700 гПа. В 2014 году влияние Сибирского максимума оказалось не столь значительным, чем атлантических циклонов, которые и предопределили режим облачности в переходной и южной зонах. Таким образом, зимний режим облачности над Западной Сибирью является более неустойчивым, чем летний. Об этом свидетельствуют существенные межгодовые колебания значений рассматриваемых характеристик облаков и то, что его в основном определяют атлантические и полярные циклоны при преобладании антициклонической деятельности в рассматриваемый сезон. Например, в 2018 году, когда сезонные значения высот геопотенциала на рассматриваемых уровнях были высокими во всем целевом регионе, а аномалии параметров облачности зафиксированы только в северной зоне.

В табл. 2 приведены значения коэффициентов корреляции (r) для рассматриваемых в работе характеристик облаков и параметров окружающей среды, рассчитанных для северной зоны Западной Сибири. Корреляция между высотами геопотенциала на различных уровнях является ожидаемо высокой, поэтому соответствующие им значения *г* в таблице не показаны. Серым цветом выделены ячейки, в которых r > 0.7, что указывает на высокую степень взаимосвязи между признаками согласно шкале Чеддока (Баврина, Борисов, 2021). Из табл. 2 видно, что в летний сезон наблюдается большее количество высоких значений коэффициентов корреляции как между рассматриваемыми характеристиками облаков, так и их с другими параметрами окружающей среды. При этом летом в дневное время прослеживается взаимосвязь между значениями высот геопотенциала на уровнях 500, 700 и 850 гПа с $\langle F \rangle$ и $\langle T_{\Pi\Pi} \rangle$, а ночью — нет. Кроме этого, интересными особенностями являются высокие значения r для $< T_{BI} >$ практически со всеми рассматриваемыми в работе параметрами в любое время суток, а также достаточно низкие значения *r* для $\langle z_{1000} \rangle$ с этими же характеристиками. В зимний период отсутствует корреляция между значениями <*z*₅₀₀>, <*z*₇₀₀>, <*z*₈₅₀> и <*z*₁₀₀₀> с параметрами облачности. Это подтверждает предположение, сделанное нами ранее, о том, что зимний режим облачности определяется не преобладающей в этом сезоне атмосферной циркуляцией (например, Сибирским максимумом), а краткосрочными воздействиями мощных атлантических и полярных циклонов. Кроме этого, высокие значения *г* для <*T*_{пп}> с другими характеристиками ночной облачности зимой свидетельствуют о влиянии солнечной активности (предположительно вследствие радиационного выхолаживания подстилающей поверхности) на облака в этом сезоне, в отличие от лета. Для остальных широтных зон целевого региона наблюдаются аналогичные зависимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты анализа многолетней изменчивости общей облачности (дневной и ночной) над различными широтными зонами Западной Сибири в летний и зимний сезоны по спутниковым данным MODIS за период 2001-2022 гг. Установлено, что межгодовые колебания рассматриваемых в работе характеристик облаков в большей степени выражены зимой, чем летом. При этом ночная и дневная облачность имеет сходные по форме временные ряды своих параметров в летний сезон и существенно различающиеся в зимний. Определены аномальные значения во временных рядах рассматриваемых в работе характеристик облаков. Так, наибольшее число аномалий параметров облачности в летний сезон наблюдается в 2001, 2010, 2012-2016 гг., а в зимний – в 2010, 2018 и 2021 году. Выполнен анализ причин возникновения аномальных значений во временных рядах характеристик облаков с помощью их сопоставления с другими параметрами окружающей среды (температурой подстилаюшей поверхности и высотами геопотенциала на различных уровнях) и ежегодными отчетами Росгидромета. В летний сезон аномалии параметров облачности регистрировались на фоне преобладания антициклонической или циклонической деятельности в рассматриваемых широтных зонах (преимущественно из-за смещения сюда восточных гребней Азорского максимума или глубокого проникновения полярных циклонов при блокировании западного переноса). Это также подтверждается значениями коэффициентов корреляции, приведенными в табл. 2. Фактор солнечной активности можно исключить из причин появления таких аномалий летом, поскольку в дневное и ночное время их величина была практически одинаковой, что, например, видно из рис. 1в. В зимний сезон аномальные значения во временных рядах параметров облачности возникали преимущественно на фоне мощных атлантических циклонов, которые достигали территории Красноярского края и проникали вглубь материка из-за меридионального переноса. Причем для появления этих аномалий достаточно было многократного кратковременного воздействия этих циркуляций на фоне преобладающего влияния Сибирского максимума, что, например, наблюдалось в 2018 году. Вклад самого антициклона в возникновение аномалий во временных рядах характеристик облаков менее значим, даже при

его существенном смещении на запад целевого региона. Кроме этого, в зимний сезон фактор солнечной активности играет более существенную роль в формировании режима облачности, о чем свидетельствуют высокие значения r для $\langle T_{nn} \rangle$ с другими характеристиками облаков в ночное время по сравнению с дневным (табл. 2). Таким образом, основной причиной возникновения аномальных значений во временных рядах рассматриваемых параметров облачности над Западной Сибирью зимой и летом является циклоническая или антициклоническая деятельность различной продолжительности, которая распространяется до барического уровня 500 гПа.

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. Изменчивость характеристик однослойных облачных полей над Западной Сибирью в зимнее время за период с 2001 по 2019 год по данным MODIS // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. (Принято в печать).

Баврина А.П., Борисов И.Б. Современные правила применения корреляционного анализа // Медицинский альманах. 2021. № 3. С. 70-79.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2008 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2009. 48 с. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2011. 66 с. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2013. 86 с. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2013 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2014. 109 с. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2015. 107 с. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2015. 107 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2017. 70 с. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2019. 79 стр.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2022. 104 с.

Комаров В.С., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я., Горев Е.В., Нахтигалова Д.П. Климатический режим нижней облачности над территорией Сибири и его современные изменения. Часть 1. Особенности режима нижней облачности // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 7. С. 579–583.

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 изменения 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.: Гидрометеоиздат, 1989. 647 с.

Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И., Мартынова Ю.В. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков // Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 2. С. 45–65.

Черенкова Е.А. Региональные особенности изменения летней температуры в Западной Сибири во второй половине XX – начале XXI века // Известия РАН. Серия географическая. 2016. № 4. С. 52–61.

Чернокульский А.В., Мохов И.И. Сравнительный анализ характеристик глобальной и зональной облачности по различным спутниковым и наземным наблюдениям // Исследование Земли из космоса. 2010. № 3. С. 12–29.

Astafurov V.G., Skorokhodov A.V., Kuryanovich K.V. Variability of parameters of single-layer cloud fields over Western Siberia in summer for the period from 2001 to 2019 according to MODIS data // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36. № 4. P. 329–336.

Chernokulsky A., Mokhov I., Nikitina N. Winter cloudiness variability over Northern Eurasia related to the Siberian High during 1966–2010 // Environ. Res. Lett. 2013. V. 8. 045012. DOI: 10.1088/1748-9326/8/4/045012.

Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Y. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // Atmos. Res. 2019. V. 267. P. 105928.

Eastman R., Warren S.G., Hahn C.J. Variations in cloud cover and cloud types over the ocean from surface observations, 1954–2008 // J. Climate. 2011. V. 24. P. 5914–5934.

Hahn C.J., Warren S.G., Eastman R. Extended edited synoptic cloud reports from ships and land stations over the globe, 1952–2009 (NDP-026C), 2012. DOI: 10.3334/CDIAC/cli.ndp026c.

Heng Z., Fu Y., Liu G., Zhou R., Wang Y., Yuan R., Guo J., Dong X. A study of the distribution and variability of cloud water using ISCCP, SSM/I cloud product, and reanalysis datasets // J. Climate. 2014. V. 27. P. 3114–3128.

Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049.

Jedlovec G. Automated detection of clouds in satellite imagery // Advances in Geoscience and Remote Sensing. 2009. P. 303–316.

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.

Kumar A. Long term (2003–2012) spatio-temporal MODIS (Terra/Aqua level 3) derived climatic variations of aerosol optical depth and cloud properties over a semi arid urban tropical region of Northern India // Atmos. Environ. 2014. V. 83. P. 291–300.

LAADS DAAC [electronic resource] / Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center. – URL: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov (access data 01.10.2023).

Li Q., Groß S. Satellite observations of seasonality and long-term trends in cirrus cloud properties over Europe: investigation of possible aviation impacts // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 15963-15980.

Li Y., Gu H. Relationship between middle stratiform clouds and large scale circulation over eastern China // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L09706. DOI:10.1029/2005GL025615.

Lomakina N.Y., Lavrinenko A.V. Modern trends of temperature of the atmospheric boundary layer over Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35. P. 378–386.

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 // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. \mathbb{N} 2. P. 1491–1509.

Matuszko D., Weglarczyk S. Long-term variability of the cloud amount and cloud genera and their relationship with circulation (Krakow, Poland) // Int. J. Climatol. 2018. V. 38. P. e1205-e1220.

MODIS Land [electronic resource] / MODIS Land Science Team. – URL: https://modis-land.gsfc.nasa.gov/index.html (access data 01.10.2023).

Mohr S., Wandel J., Lenggenhager S., Martius O. Relationship between atmospheric blocking and warm-season thunderstorms over western and central Europe // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2019. V. 145. № 724. P. 3040–3056.

Mokhov I.I. Specific features of the 2010 summer heat formation in the European territory of Russia in the context of general climate changes and climate anomalies // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2011. V. 47. 653–660.

Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Osipov A.M. Atmospheric centers of action in the Northern and Southern hemispheres: features and variability // Russ. Meteorol. Hydrol. 2020. V. 45. P. 749–761.

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.

Schiffer R.A., Rossow W.B. The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The first project of the World Climate Research Programme // Bull. Amer. Met. Soc. 1983. V. 64. № 7. P. 779–784.

Shakina N.P., Ivanova A.R. The blocking anticyclones: the state of studies and forecasting // Russ. Meteorol. Hydrol. 2010. V. 35. P. 721–730.

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.

Su H., Jiang J.H. Tropical clouds and circulation changes during the 2006/07 and 2009/10 El Ninos // J. Climate. 2013. V. 26. P. 399–413.

The Earth Observator [electronic resource] / Land Surface Temperature Anomaly, 2000 – 2023. – URL: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTAD_M (access data 01.10.2023).

Tritscher I. et al. Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion // Reviews of geophysics. 2021. V. 59. № 2. P. e2020RG000702.

University of Wyoming [electronic resource] / Department of Atmospheric Science. – URL: http://weather.uwyo.edu/ upperair/sounding.html (access data 01.10.2023).

Zhao M., Zhang H., Wang H., Zhou X., Zhu L., An Q., Chen Q. The change of cloud top height over East Asia during 2000– 2018 // Adv. Clim. Chang. Res. 2020. V. 11. № 2. P. 110–117.

Summer and Winter Anomalies of Day and Night Cloud Parameters over Western Siberia Using MODIS Data and ERA5 Reanalysis During 2001–2022

A. V. Skorokhodov¹, K. V. Kuryanovich¹, V. G. Astafurov¹

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

We present the results of analysis of multiyear variability of cloud parameters (day and night) over Western Siberia in summer and winter during 2001-2022 based on MODIS data and ERA5 reanalysis. Three latitude zones of the target region are considered: northern (66-72° N, 68-82° E), transitional (60-65° N, 62-88° E) and southern (54-59° N, 62-88° E). We have plotted time series and on their basis we have identified trends of the following cloud parameters: fraction, top height, top pressure, top temperature and effective emissivity. It was found that in 2010, 2012, 2014 and 2016, the largest number of anomalies in the time series of the above cloud features was observed. The comparison results for the considered cloud parameters with the variability of the land surface temperature and geopotential heights at the baric levels of 500, 700, 850 and 1000 hPa are presented. We discuss hypotheses about the causes of anomalous values in time series of investigated cloud parameters at different times of day in summer and winter, related to the specific features of atmospheric circulation over Western Siberia in different years.

Keywords: cloud parameters, Western Siberia, multiyear trends, MODIS satellite data, ERA5 reanalysis

REFERENCES

Astafurov V.G., Skorokhodov A.V., Kur'yanovich K.V. Izmenchivost' kharakteristik odnosloinykh oblachnykh polei nad Zapadnoi Sibir'yu v zimnee vremya za period s 2001 po 2019 god po dannym MODIS [Variability in parameters of single-layer cloud fields over Western Siberia in winter for the period from 2001 to 2019 according to MODIS data] // Optika atmosfery i okeana. 2023. V. 36. (In print). (In Russian).

Astafurov V.G., Skorokhodov A.V., Kuryanovich K.V. Variability of parameters of single-layer cloud fields over Western Siberia in summer for the period from 2001 to 2019 according to MODIS data // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36. № 4. P. 329–336.

Bavrina A.P., Borisov I.B. Sovremennye pravila primeneniya korrelyatsionnogo analiza [Modern rules for application of correlation analysis] // Meditsinskii al'manakh. 2021. № 3. P. 70–79. (In Russian).

Cherenkova E.A. Regional'nye osobennosti izmeneniya letnei temperatury v Zapadnoi Sibiri vo vtoroi polovine KhKh - nachale XXI veka [Regional peculiarities of summer temperature change in Western Siberia in the second half of 20th – early 21st centuries] // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. 2016. \mathbb{N} 4. P. 52–61. (In Russian).

Chernokul'skii A.V., Mokhov I.I. Sravnitel'nyi analiz kharakteristik global'noi i zonal'noi oblachnosti po razlichnym sputnikovym i nazemnym nablyudeniyam [Comparative analysis of global and zonal cloudiness characteristics by different satellite and ground observations] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2010. № 3. P. 12–29. (In Russian).

Chernokulsky A., Mokhov I., Nikitina N. Winter cloudiness variability over Northern Eurasia related to the Siberian High during 1966–2010 // Environ. Res. Lett. 2013. V. 8. 045012. DOI: 10.1088/1748-9326/8/4/045012.

Chernokulsky A., Shikhov A., Bykov A., Kalinin N., Kurgansky M., Sherstyukov B., Yarinich Y. Diagnosis and modelling of two destructive derecho events in European Russia in the summer of 2010 // Atmos. Res. 2019. V. 267. P. 105928.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2008 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2008]. Moscow: Roshydromet Publ., 2009. 48 p. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2010 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2010]. Moscow: Roshydromet Publ., 2011. 66 p. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2012 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2012]. Moscow: Roshydromet Publ., 2013. 86 p. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2013 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2013]. Moscow: Roshydromet Publ., 2014. 109 p. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2014 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2014]. Moscow: Roshydromet Publ., 2015. 107 p. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2015 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2015]. Moscow: Roshydromet Publ., 2016. 68 p. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2016 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2016]. Moscow: Roshydromet Publ., 2017. 70 p. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2018 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2018]. Moscow: Roshydromet Publ., 2019. 89 p. (In Russian).

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2021 god [Report about climate specifics on the territory of the Russian Federation for 2021]. Moscow: Roshydromet Publ., 2022. 48 p. (In Russian).

Eastman R., Warren S.G., Hahn C.J. Variations in cloud cover and cloud types over the ocean from surface observations, 1954–2008 // J. Climate. 2011. V. 24. P. 5914–5934.

Hahn C.J., Warren S.G., Eastman R. Extended edited synoptic cloud reports from ships and land stations over the globe, 1952–2009 (NDP-026C), 2012. DOI: 10.3334/CDIAC/cli. ndp026c.

Heng Z., Fu Y., Liu G., Zhou R., Wang Y., Yuan R., Guo J., Dong X. A study of the distribution and variability of cloud water using ISCCP, SSM/I cloud product, and reanalysis datasets // J. Climate. 2014. V. 27. P. 3114–3128.

Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2020. V. 146. P. 1999–2049.

Jedlovec G. Automated detection of clouds in satellite imagery // Advances in Geoscience and Remote Sensing. 2009. P. 303–316.

Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Usova E.I., Martynova Yu.V. Tendentsii izmeneniya ekstremal'nosti klimata Zapadnoi Sibiri v kontse XX – nachale XXI vekov [Tendencies in changes of climate extremality in Western Siberia at the end of the XX century and the beginning of the XXI century] // Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya. 2019. V. 2. P. 45–65. (In Russian).

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.

Komarov V.S., Il'in S.N., Lavrinenko A.V., Lomakina N.Ya., Gorev E.V., Nakhtigalova D.P. Klimaticheskii rezhim nizhnei oblachnosti nad territoriei Sibiri i ego sovremennye izmeneniya. Chast' 1. Osobennosti rezhima nizhnei oblachnosti [Climatic regime of lower cloudiness over the territory of Siberia and its modern changes. Part 1. Specific features of the lower cloud regime] // Optika atmosfery i okeana. 2013. V. 26. № 7. P. 579–583. (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 osobennostei 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). *Kumar A*. Long term (2003–2012) spatio-temporal MODIS (Terra/Aqua level 3) derived climatic variations of aerosol optical depth and cloud properties over a semi arid urban tropical region of Northern India // Atmos. Environ. 2014. V. 83. P. 291–300.

LAADS DAAC [electronic resource] / Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center. – URL: https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa. gov (access data 01.10.2023).

Li Q., Groß S. Satellite observations of seasonality and longterm trends in cirrus cloud properties over Europe: investigation of possible aviation impacts // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22. P. 15963–15980.

Li Y., Gu H. Relationship between middle stratiform clouds and large scale circulation over eastern China // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L09706. DOI: 10.1029/2005GL025615.

Lomakina N.Y., Lavrinenko A.V. Modern trends of temperature of the atmospheric boundary layer over Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35. P. 378–386.

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 // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17. № 2. P. 1491–1509.

Matuszko D., Weglarczyk S. Long-term variability of the cloud amount and cloud genera and their relationship with circulation (Krakow, Poland) // Int. J. Climatol. 2018. V. 38. P. e1205-e1220.

MODIS Land [electronic resource] / MODIS Land Science Team. – URL: https://modis-land.gsfc.nasa.gov/index.html (access data 01.10.2023).

Mohr S., Wandel J., Lenggenhager S., Martius O. Relationship between atmospheric blocking and warm-season thunderstorms over western and central Europe // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2019. V. 145. № 724. P. 3040–3056.

Mokhov I.I. Specific features of the 2010 summer heat formation in the European territory of Russia in the context of general climate changes and climate anomalies // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2011. V. 47. P. 653–660. *Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Osipov A.M.* Atmospheric centers of action in the Northern and Southern hemispheres: features and variability // Russ. Meteorol. Hydrol. 2020. V. 45. P. 749–761.

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.

Schiffer R.A., Rossow W.B. The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The first project of the World Climate Research Programme // Bull. Amer. Met. Soc. 1983. V. 64. № 7. P. 779–784.

Shakina N.P., Ivanova A.R. The blocking anticyclones: the state of studies and forecasting // Russ. Meteorol. Hydrol. 2010. V. 35. P. 721–730.

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.

Su H., Jiang J.H. Tropical clouds and circulation changes during the 2006/07 and 2009/10 El Ninos // J. Climate. 2013. V. 26. P. 399–413.

The Earth Observator [electronic resource] / Land Surface Temperature Anomaly, 2000 – 2023. – URL: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTAD_M (access data 01.10.2023).

Tritscher I. et al. Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion // Reviews of geophysics. 2021. V. 59. № 2. P. e2020RG000702.

University of Wyoming [electronic resource] / Department of Atmospheric Science. – URL: http://weather.uwyo.edu/up-perair/sounding.html (access data 01.10.2023).

Zhao M., Zhang H., Wang H., Zhou X., Zhu L., An Q., Chen Q. The change of cloud top height over East Asia during 2000– 2018 // Adv. Clim. Chang. Res. 2020. V. 11. № 2. P. 110–117.