

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.576.36

Изменчивость характеристик однослойных облачных полей над Западной Сибирью в летнее время за период с 2001 по 2019 г. по спутниковым данным MODIS

В.Г. Астафуров, А.В. Скороходов[✉], К.В. Курьянович*

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

Поступила в редакцию 27.07.2022 г.;
после доработки 30.12.2022 г.;
принята к печати 25.01.2023 г.

Представлены результаты оценки многолетней изменчивости характеристик полей однослойной облачности над территорией Западной Сибири в летнее время с 2001 по 2019 г. на основе спутниковых данных MODIS. Среднесезонная доля покрытия территории однослойными облаками разных типов и их параметры определяются на основе результатов классификации облачности по ежедневным летним (июнь, июль, август) изображениям целевого региона из космоса. Характеристики однослойной облачности рассмотрены для трех широтных зон Западной Сибири: южной ($<60^\circ$ с.ш.), переходной ($60-65^\circ$ с.ш.) и северной ($>65^\circ$ с.ш.). По многолетним данным найдены параметры линейных трендов доли покрытия различными типами однослойной облачности и их характеристик: оптической толщины, эффективного радиуса частиц, водозапаса и высоты верхней границы. Наибольшей изменчивостью рассматриваемых в работе физических параметров обладают облака вертикального развития и облака нижнего яруса в северной и переходной зонах. Показано влияние аномальных блокирующих антициклонов на некоторые характеристики различных типов облачности в исследуемых широтных зонах Западной Сибири.

Ключевые слова: Западная Сибирь, однослойная облачность, физические параметры, многолетние тренды, спутниковые данные, блокирующие антициклоны; Western Siberia, single-layer clouds, physical parameters, multiyear trend, satellite data, blocking anticyclone.

Введение

Ежедневно согласно различным источникам [1, 2] облачность покрывает 60–70% поверхности Земли. Облака принимают непосредственное участие в разных процессах в системе «атмосфера – океан – суша»: гидрологическом цикле, радиационном переносе, транспорте аэрозоля и др. Поэтому облачность является одним из основных объектов исследований в климатологии и метеорологии. Облачные поля неоднородны, а их протяженность может достигать нескольких тысяч километров. Современный метеорологический стандарт разделяет облака на 27 разновидностей, включая 10 основных форм, их подтипы и некоторые сочетания [3]. Существующая классификация облачности основана на морфологическом описании ее типов при наблюдении за нею с земли, представленном в «Атласе облаков» [4]. Однако возникновение каждого типа облачности обусловлено конкретными механизмами, к которым относятся внутренние волны, конвекция, конвергенция и процессы общей циркуляции атмо-

сферы (например, струйные течения, фронты и циклоны) [5]. Поэтому информация о высокой повторяемости определенных разновидностей облаков над отдельно взятым регионом планеты за продолжительный период времени может указывать на преобладание здесь тех или иных атмосферных процессов. При этом изменение режима облачности над этими территориями можно рассматривать в качестве одного из маркеров происходящих климатических изменений.

В настоящее время существует более 10 баз данных, содержащих информацию об изменчивости характеристик в основном общей и нижней облачности как над отдельно взятыми регионами, так и над всей планетой в целом [1, 2, 6–8]. Здесь уместно упомянуть работы В.С. Комарова [9–11] применительно к территории Западной Сибири в качестве примера детального анализа повторяемости облаков нижнего яруса. Существующие в настоящее время результаты изучения отдельных типов облачности и их характеристик для территории Российской Федерации получены на основе данных наземных и самолетных наблюдений и ограничены началом 1990-х гг. [5]. Сбор более актуальной информации о многолетней изменчивости параметров конкретных разновидностей облаков осложняется регуляр-

* Владимир Глебович Астафуров (astafurov@iao.ru);
Алексей Викторович Скороходов (vazime@yandex.ru); Ксения Викторовна Курьянович (ksuyain@mail.ru).

ным сокращением числа метеорологических станций и эпизодичностью авиационных измерений [12]. Очевидным решением данной проблемы является использование результатов дистанционного зондирования Земли из космоса. Однако различие характеристик целевой аппаратуры и алгоритмов тематической обработки данных затрудняет изучение многолетней изменчивости параметров полей облачности. При этом существуют уникальные ряды однородных спутниковых данных за несколько десятилетий, полученных с помощью одних и тех же приборов, например MODIS, которые позволяют надежно оценивать изменение характеристик облаков уже с климатологической точки зрения.

Западная Сибирь — один из основных регионов-индикаторов глобальных климатических изменений. Так, результаты спутниковых и наземных измерений, а также данные реанализов свидетельствуют о значительном увеличении здесь числа температурных аномалий за последние десятилетия [13]. Этому способствуют орографические особенности региона. Западно-Сибирская равнина представляет собой низменную, сильно заболоченную и залесенную территорию. На западе она 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 [14]. Особое географическое положение создает условия для развития ярко выраженного меридионального переноса, усиливающегося в случаях формирования обширных блокирующих антициклонов над европейской территорией России или возникновения зимой сезонного центра действия атмосферы (Азиатского (Сибирского) антициклона) [15, 16]. Поэтому для Западной Сибири свойственны значительные температурные колебания в течение года, а также продолжительные периоды аномально жаркой или холодной погоды. Примечательно, что увеличение числа температурных аномалий в указанном регионе сопровождается одновременным сокращением площади многолетнего морского льда в Российском секторе Арктики и заболачиванием территории лесотундры и тундры [17, 18]. Можно предположить, что и режим облачности в Западной Сибири претерпел изменения за последние десятилетия по причине усиления/ослабления процессов, происходящих в системе «атмосфера — океан — суша». Причем эти изменения должны были коснуться как общей облачности в целом, так и многослойных и однослойных облаков в частности.

Целью данной работы является анализ многолетней изменчивости характеристик полей однослойной облачности над Западной Сибирью в летнее время по спутниковым данным с 2001 по 2019 г.

Исходные данные

В работе рассматриваются следующие широтные зоны Западной Сибири для получения более детальных результатов анализа многолетней изменчивости характеристик полей однослойной облачности: юж-

ная (< 60° с.ш.), переходная (60–65° с.ш.) и северная (> 65° с.ш.). В качестве основного источника информации о параметрах облаков над целевым регионом использовались данные MODIS, полученные в июне–августе 2001–2019 г. Спутники Terra и Aqua, на которых установлен спектрорадиометр MODIS, пересекают экватор в рассматриваемом часовом поясе в 03:30 и 06:30 UTC соответственно. Это позволяет охватывать практически весь целевой регион одним-двумя последовательными снимками ежедневно при углах отклонения от надира не более 40°, что исключает из рассмотрения искажения на краях изображений, обусловленные геометрией съемки [19].

В табл. 1 приведена используемая в работе летняя объединенная классификация облачности, предложенная нами в [20] с учетом метеорологического стандарта и характеристик спектрорадиометра MODIS, в частности его пространственного разрешения. Она, несмотря на уменьшение числа разновидностей облачности с 27 до 15, позволяет выявлять практически все процессы в системе «атмосфера — океан — суша», которые генерируют облака. Так, подтипы слоисто-кучевой (*Sc cuf* и *Sc und*) и высококучевой (*Ac cuf* и *Ac und*) облачности хоть и относятся к одним типам (*Sc* и *Ac* соответственно), но образуются в результате разных механизмов. Возникновение кучевообразных облаков (*Sc cuf* и *Ac cuf*) обусловлено конвекцией, а волнистообразной облачности (*Sc und* и *Ac und*) — генерацией и распространением волн Кельвина–Гельмгольца [4]. Таким образом, представленная классификация облачности обеспечивает возможность выявлять над целевыми регионами планеты преобладание процессов как мезомасштабного характера (например, внутренних волн и конвекции), так и более глобальных (например, атмосферных фронтов и циклонов).

Таблица 1

Объединенная классификация облачности

№	Название	Обозначение
<i>Облака вертикального развития</i>		
1	Кучевые плоские	<i>Cu hum</i>
2	Кучевые средние и мощные	<i>Cu med/cong</i>
3	Кучево-дождевые лысые	<i>Cb calv</i>
4	Кучево-дождевые волосатые	<i>Cb cap</i>
<i>Облака нижнего яруса</i>		
5	Слоисто-кучевые кучевообразные	<i>Sc cuf</i>
6	Слоисто-кучевые волнистообразные	<i>Sc und</i>
7	Слоистые	<i>St</i>
8	Слоисто-дождевые	<i>Ns</i>
<i>Облака среднего яруса</i>		
9	Высококучевые	<i>As</i>
10	Высококучевые кучевообразные	<i>Ac cuf</i>
11	Высококучевые волнистообразные	<i>Ac und</i>
<i>Облака верхнего яруса</i>		
12	Перистые нитевидные	<i>Ci fib</i>
13	Перистые плотные	<i>Ci sp</i>
14	Перисто-слоистые	<i>Cs</i>
15	Перисто-кучевые	<i>Cc</i>

В работе использовались дневные изображения MODIS с пространственным разрешением 250 м (0,62–0,67 мкм), тематические продукты MOD06_L2 и MYD06_L2 с пространственным разрешением 1000 м, содержащие характеристики облаков, а также файлы геопривязки MOD03 и MYD03. При этом рассматривались следующие параметры облачности: оптическая толщина (τ), эффективный радиус частиц ($r_{эфф}$), водозапас (P) и высота ее верхней границы ($h_{вг}$). Кроме этого определялась среднесезонная доля покрытия однослойными облаками разных типов $n_s(\text{type})$ территорий выделенных широтных зон Западной Сибири с 2001 по 2019 г. Решение о наличии облачности только в одном или нескольких ярусах одновременно принималось на основе значения соответствующего флага в тематических продуктах MOD06_L2 и MYD06_L2. Для согласованности результатов восстановления характеристик облаков между Terra и Aqua использовались наборы данных, полученные на основе каналов 2,2 и 11 мкм [21]. Величиной зенитного угла Солнца можно пренебречь в каждом отдельном случае, поскольку построение многолетних трендов перечисленных выше параметров облачности предполагает охват большого объема информации [22].

Методика анализа

Методика анализа многолетней изменчивости характеристик полей однослойной облачности над рассматриваемыми широтными зонами Западной Сибири основана на использовании результатов распознавания 15 разновидностей облаков из табл. 1 на ежедневных спутниковых снимках MODIS. Облачность классифицировалась с помощью алгоритма, основанного на применении вероятностной нейронной сети, детальное описание которого представлено в [20]. Указанный классификатор позволяет распознавать 15 разновидностей облаков на спутниковых снимках, полученных в дневное время суток при отсутствии снежного покрова, с вероятностью 0,85, что является одним из самых высоких показателей в данной области [23]. Результат распознавания — перекрашенное в псевдоцвета изображение MODIS, каждое из которых соответствует конкретному типу облачности.

На полученный после выполнения процедуры классификации облачности спутниковый снимок накладываются границы рассматриваемых в работе широтных зон Западной Сибири. После обработки всех данных для каждого целевого региона находят оценки среднесезонной доли их покрытия однослойными облаками различных разновидностей $n_s(\text{type})$ из табл. 1 по следующей формуле:

$$n_s(\text{type}) = \frac{\sum_{i=1}^M \frac{S_{\text{type},i}}{S_i}}{M},$$

где type — идентификатор типов облачности, приведенных в табл. 1; M — количество обработанных

изображений за три летних месяца каждого года; $S_{\text{type},i}$ — число пикселей в зоне, принадлежащих данной разновидности облаков в i -й день; S_i — размер зоны в пикселях. Среднесезонная доля однослойной облачности определяется выражением

$$v_s = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{\text{type}} \frac{S_{\text{type},i}}{S_i}}{M}.$$

Подобным образом на основе данных тематических продуктов MOD06_L2 и MYD06_L2 вычислялись ежегодные сезонные оценки средних значений исследуемых параметров различных типов облачности $\langle \tau \rangle_s$, $\langle r_{эфф} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{вг} \rangle_s$ для каждой широтной зоны Западной Сибири. На заключительном этапе выполнялось выделение многолетних трендов перечисленных выше характеристик облаков.

Результаты и обсуждение

Многолетняя среднесезонная доля покрытия однослойной облачностью территории северной зоны Западной Сибири по результатам обработки данных MODIS составляет $v_s = 40\%$, переходной — $v_s = 41\%$ и южной — $v_s = 38\%$. На рис. 1 показаны многолетние ряды значений $n_s(\text{type})$ для некоторых разновидностей облаков из различных ярусов согласно табл. 1. Анализируя полученные результаты, можно сделать ряд выводов. Более высокий контраст значений среднесезонной доли покрытия наблюдается между северной и переходной зонами, чем между переходной и южной у таких типов облачности, как *Cu hum* (рис. 1, а), *Sc und* (рис. 1, б), *Cu med/cong*, *Cb cap*, *St*, *Ns*, *Ci fib* и *Cc*. Поскольку для большинства из них характерна $h_{вг} = 2,5$ км, то можно предположить, что указанные зональные различия $n_s(\text{type})$ связаны с изменениями температурного режима подстилающей поверхности. Большую часть Западной Сибири в летний сезон покрывают облака *Cu hum*, *Sc cuf*, *Sc und*, *Ns* и *Ac cuf*. Причем в северной зоне $n_s(\text{type})$ выше у разновидностей облаков, генерируемых внутренними волнами (*Sc und* и *Ac und*), а в южной — у облачности, образующейся под воздействием конвекции (*Cu hum* и *Sc cuf*). Для облаков верхнего яруса контраст среднесезонной доли покрытия между рассматриваемыми широтными зонами выражен менее ярко. Отметим, что оценки $n_s(\text{type})$ не противоречат информации о повторяемости отдельных типов облачности до начала 1990-х гг., полученной на основе регулярных наземных и самолетных наблюдений [5], и дополняют наблюдения.

Кроме этого, из рис. 1 видно, что для некоторых разновидностей облаков (*Sc und* и *Ac cuf*) наблюдаются аномальные значения n_s в 2010 г. во всех широтных зонах региона. Аналогичные «выбросы» зарегистрированы для *Cb calv* и *Ac und*. В это время над европейской территорией России в течение 55 дней находился антициклон [24, 25].

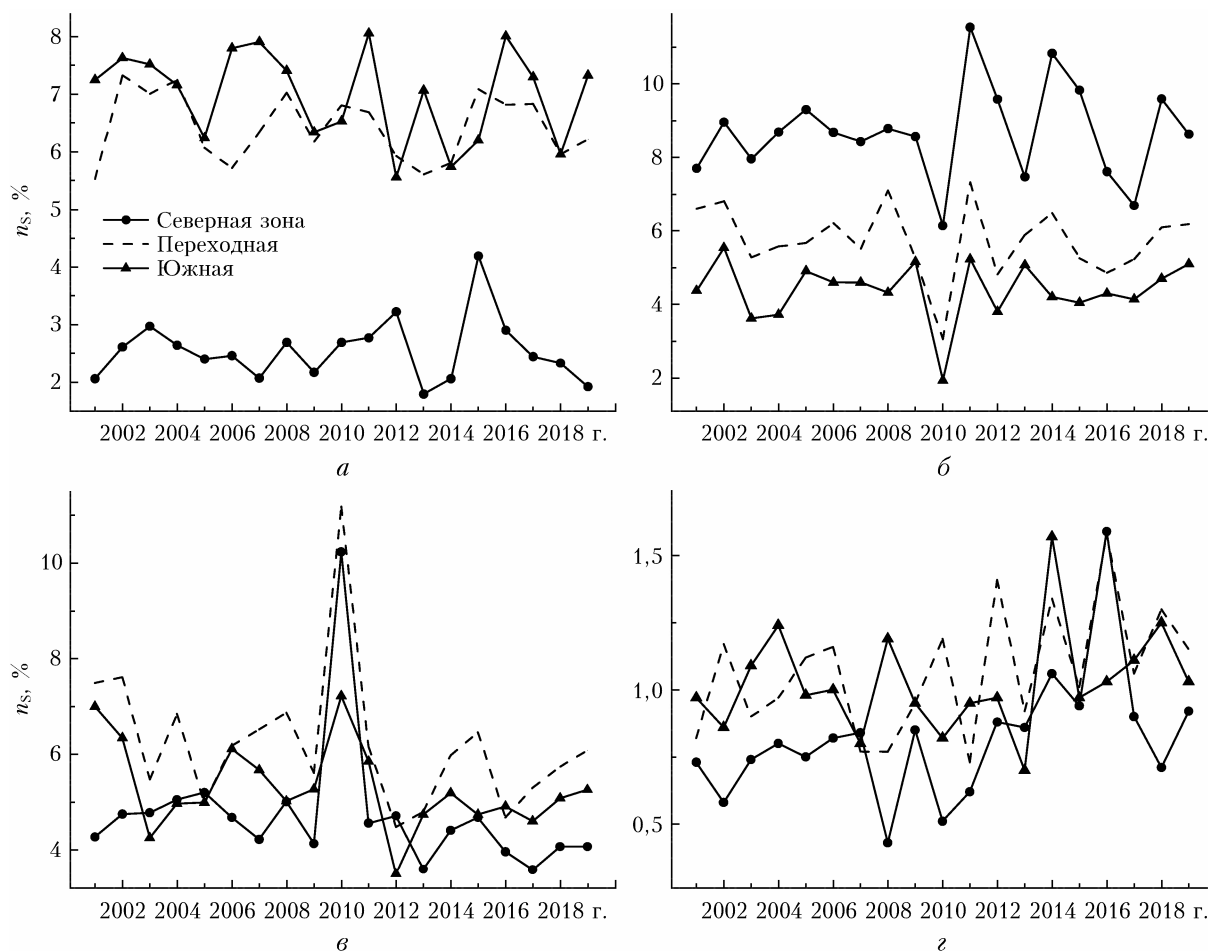


Рис. 1. Среднесезонная доля покрытия облаками *Cu hum* (а), *Sc cuf* (б), *Ac cuf* (в), *Cs* (г) исследуемых широтных зон Западной Сибири в летнее время

Сопоставив эти события, можно выдвинуть гипотезу о том, что усиление меридионального переноса на фоне блокирования западного приводит к изменению горизонтальных размеров мезомасштабных процессов, а именно внутренних волн и конвекции. Так, среднесезонная доля покрытия облаками *Sc und*, генерируемых волнами Кельвина–Гельмгольца, снизилась в среднем на 2% по всей Западной Сибири (рис. 1, б), а облаков *Ac cuf*, возникающих благодаря конвекции, наоборот, увеличилась приблизительно на 4% в каждой широтной зоне. Примечательно, что в 2010 г. среднесезонная доля покрытия территории Западной Сибири облаками глубокой конвекции *Cb calv* и *Cb cap* была самой низкой за весь рассматриваемый в работе период времени. Аномалии формирования конвективной облачности в периоды атмосферного блокирования отмечены также в [26, 27].

В табл. 2 приведены оценки характеристик линейного тренда относительной доли покрытия подстилающей поверхности однослойными облаками различных типов

$$\Delta_n(\text{type}) = \frac{a_n \Delta t}{\langle n_s(\text{type}) \rangle},$$

где a_n — угловые коэффициенты линии тренда, найденные методом наименьших квадратов по многолетним данным $n_s(\text{type})$ с 2001 по 2019 г.; $\langle n_s(\text{type}) \rangle$ — оценка многолетнего среднего. Для удобства практического использования полученных результатов принято $\Delta t = 10$. Подтипы облачности, не включенные в табл. 2, имеют низкие значения n_s или нейтральный тренд во всех зонах.

Из табл. 2 видно, что в целом по региону наблюдается ярко выраженное уменьшение доли покрытия ее территории однослойными облаками нижнего и среднего ярусов в летнее время, особенно слоистообразными формами. Отметим, что в [11] также отмечено сокращение количества нижней облачности летом над всей Западной Сибирью согласно данным наземных метеостанций. Количество конвективной и перистой облачности практически не изменяется главным образом в северной и переходной зоне. Анализируя табл. 2, можно сделать вывод о том, что наиболее устойчивый режим однослойной облачности за рассматриваемый период наблюдается в южной зоне Западной Сибири.

На рис. 2 показана многолетняя изменчивость $\langle \tau \rangle_s$, $\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$ для облаков *Sc und*. Эти зависимости хорошо согласуются с изменениями $n_s(\text{Sc und})$, за исключением эффективного радиуса

Таблица 2

Оценки характеристик линейного тренда $n_s(\text{type})$ различных типов облачности и многолетние средние $\langle n_s(\text{type}) \rangle_{\Delta t}$

Тип облачности	$\Delta_n / \langle n_s \rangle, \%$		
	Северная зона	Переходная зона	Южная зона
<i>Cu hum</i>	Н	Н	-0,06/7,0
<i>Sc cuf</i>	-0,05/4,6	-0,15/6,1	-0,07/6
<i>Sc und</i>	0,02/8,7	-0,05/5,7	Н
<i>Ns</i>	-0,10/6,7	Н	Н
<i>Ac cuf</i>	-0,11/4,7	-0,13/6,2	-0,11/5,3
<i>Ac und</i>	-0,17/3,4	-0,14/3,0	-0,04/2,6
<i>Cc</i>	—	Н	0,03/2,9

Примечание. «—» — низкая доля покрытия $\langle n_s \rangle < 2\%$; «Н» — нейтральный тренд доли покрытия при $|\Delta_n| < 0,02$.

частиц (см. рис. 1, б). Однако различие перечисленных выше характеристик облаков между исследуемыми широтными зонами выражено в меньшей степени, чем у $n_s(\text{type})$. Отметим, что значения $\langle \tau \rangle_s$,

$\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{вг}} \rangle_s$ у *Sc und* не выходят за пределы допустимых диапазонов, приведенных в известной справочной литературе по облакам [4, 5, 28]. Кроме этого, из рис. 2 видно, что параметры облаков *Sc und* также имеют отклики на события атмосферного блокирования в 2010 г., как и $n_s(\text{Sc und})$, за исключением эффективного радиуса частиц. Причем сезонные средние $\langle \tau \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{вг}} \rangle_s$ уменьшились в ответ на атмосферное блокирование над европейской частью России, что предположительно связано с уменьшением высоты слоев температурной инверсии, над которой образуются облака *Sc und*, при увеличении давления. Следует отметить, что аномальные значения параметров облачности (преимущественно оптической толщины и водозапаса) наблюдались не только в 2010 г. в различных широтных зонах, но и в 2012 г. (например, у облаков *Cu hum*), когда долгоживущий антициклон установился над территорией уже самой Западной Сибири.

Приведем оценки точности результатов восстановления значений среднесезонной доли покрытия исследуемой территории облаками различных типов и их параметров. В качестве меры погрешности

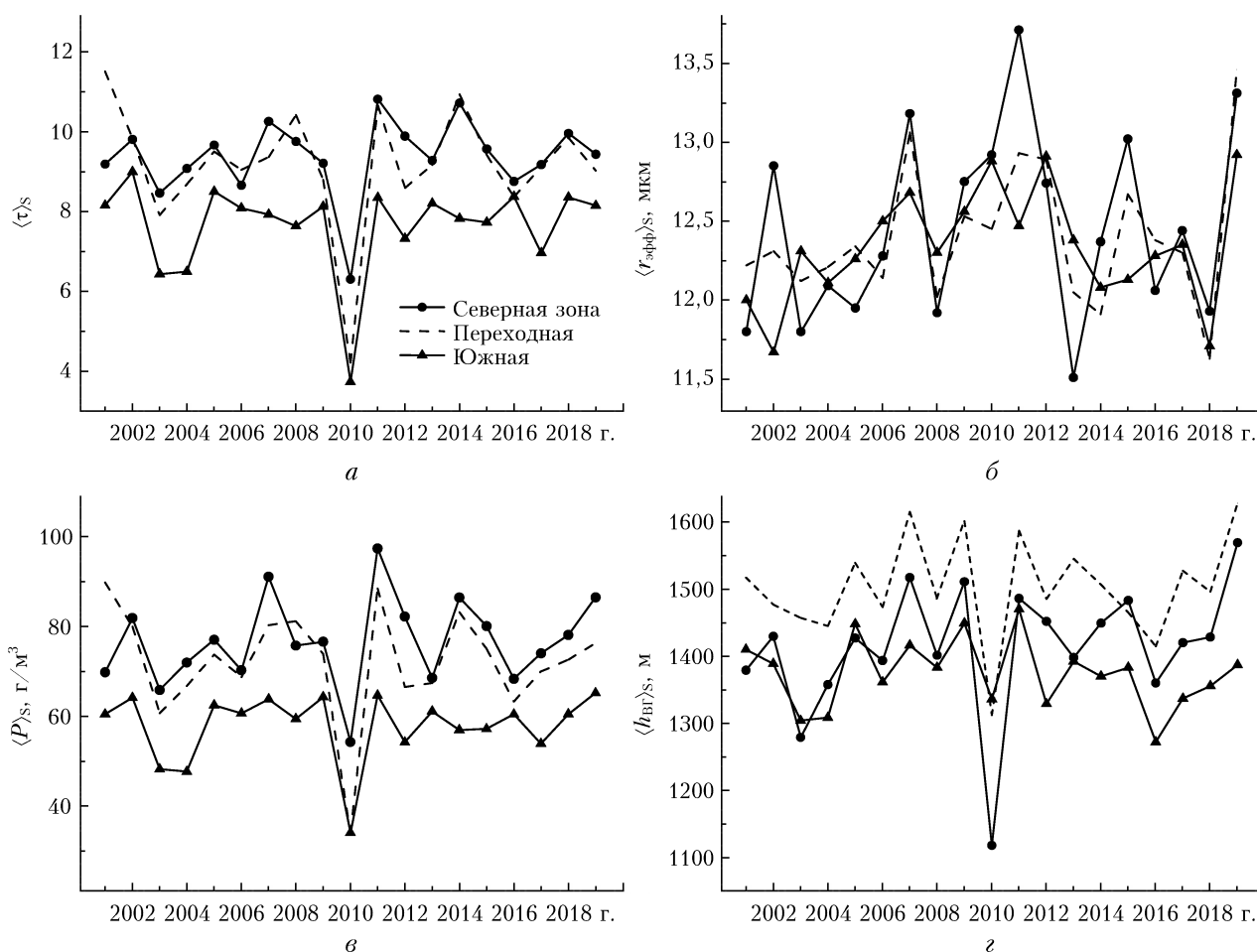


Рис. 2. Многолетняя изменчивость оптической толщины (а), эффективного радиуса частиц (б), водозапаса (в) и высоты верхней границы (г) облаков *Sc und* над различными широтными зонами Западной Сибири в летнее время (с 2001 по 2019 г.)

будем рассматривать относительную среднеквадратическую ошибку δ . Так, для облаков *Sc und* в 2019 г. в переходной зоне $\delta(n_s) = 3\%$; $\delta(\langle\tau\rangle_s) = 5\%$; $\delta(\langle r_{эфф}\rangle_s) = 3\%$; $\delta(\langle P\rangle_s) = 6\%$; $\delta(\langle h_{вг}\rangle_s) = 6\%$. Для остальных типов облачности оценки δ имеют близкие значения.

В табл. 3 приведены оценки относительной многолетней изменчивости $\langle\tau\rangle_s$ и $\langle P\rangle_s$ различных типов облачности над исследуемыми широтными зонами Западной Сибири. При этом значения Δ_τ и Δ_P рассчитываются аналогично Δ_n . Здесь $\langle\langle\cdot\rangle\rangle_s$ обозначает последовательные усреднения по сезону и многолетнему ряду наблюдений. Из табл. 3 видно, что в целом по всей Западной Сибири наблюдается увеличение оптической толщины облаков нижнего и верхнего ярусов. Значения $\langle\tau\rangle_s$ конвективной облачности растут в северной зоне и уменьшаются в остальных регионах, а у облаков среднего яруса оптическая толщина для всей Западной Сибири имеет нейтральный тренд. В северной зоне значения τ уменьшаются только у *St*. Анализируя табл. 3, можно сделать вывод о том, что нейтральным и отрицательным трендами водозапаса характеризуются облака вертикального развития во всех

широтных зонах, а облака нижнего и среднего ярусов имеет такие характеристики только в переходной. Сокращение водозапаса наблюдается для всех типов облачности, дающих основной вклад в суммарное количество осадков в рассматриваемый сезон, — *Cu*, *Cb* и *Ns*.

Эффективный радиус частиц характеризуется меньшей изменчивостью, чем оптическая толщина и водозапас. Незначительное (на 2–5%) сокращение $\langle r_{эфф}\rangle_s$ у *Cu med/cong*, *Cb calv*, *As* и увеличение значений указанного параметра у *St* наблюдаются во всех зонах. Растет высота верхней границы конвективной облачности, облаков нижнего и верхнего яруса в целом по всей Западной Сибири. Прирост $\langle h_{вг}\rangle_s$ в июле у облаков глубокой конвекции над исследуемым регионом обсуждается в [29]. Облака среднего яруса характеризуются преимущественно отрицательным трендом данного параметра во всех зонах. При этом наибольшая изменчивость $\langle h_{вг}\rangle_s$ наблюдается у облаков *Cu hum*, *St* и *As*.

Наиболее существенные изменения рассматриваемых параметров облачности наблюдаются в северной и переходной зонах у облаков вертикального развития и нижнего яруса. Это дает основание предполагать наличие связей между данными явлениями и увеличением числа температурных аномалий в этих регионах за последние два десятилетия [13]. Подтверждение указанной гипотезы можно рассматривать в качестве перспективного направления развития нашей работы.

Заключение

Основным результатом работы являются оценки многолетней изменчивости характеристик различных разновидностей облаков над отдельными широтными зонами Западной Сибири. Установлен ряд особенностей изменения режима однослойной облачности над рассматриваемым регионом за 2001–2019 гг. Выявлено сокращение доли покрытия территории Западной Сибири в целом облаками нижнего и среднего ярусов. Количество остальных типов облачности характеризуется нейтральным трендом. При этом наибольшая сезонная изменчивость наблюдается у характеристик облаков вертикального развития и нижнего яруса в северной и переходной зонах. Предположительно данный факт может быть связан с увеличением числа температурных аномалий в исследуемом регионе [13], поскольку температура подстилающей поверхности является одним из ключевых факторов при образовании указанных типов облачности. Кроме этого, маркером происходящих в Западной Сибири изменений климата может выступать сокращение водозапаса у облаков, дающих наибольшее количество осадков, — *Cu*, *Cb* и *Ns*. Также наблюдается увеличение оптической толщи облачности верхнего яруса и высоты ее верхней границы во всех широтных зонах Западной Сибири. Для оценки абсолютных значений перечисленных выше изменений режима облачности можно воспользоваться средними значениями из табл. 2 и 3.

Таблица 3

Оценки характеристик линейного тренда $\langle\tau\rangle_s$ и $\langle P\rangle_s$ различных типов облачности и многолетние средние $\langle\langle\tau\rangle\rangle_s$ и $\langle\langle P\rangle\rangle_s$

Тип облачности	Северная зона	Переходная зона	Южная зона
$\Delta_\tau / \langle\langle\tau\rangle\rangle_s$			
<i>Cu hum</i>	0,03/10	–0,02/9,7	–0,02/8,9
<i>Cb calv</i>	0,03/30	Н	Н
<i>Cb cap</i>	Н	–0,03/52	–0,03/50
<i>Sc cuf</i>	0,03/9,1	Н	Н
<i>Sc und</i>	0,02/9,4	–0,02/9,2	Н
<i>St</i>	–0,03/12	0,09/11	Н
<i>Ns</i>	0,02/20	Н	Н
<i>As</i>	Н	0,03/17	–0,03/21
<i>Ac und</i>	Н	Н	0,04/7,2
<i>Ci fib</i>	0,04/2,8	0,03/2,8	0,04/2,7
<i>Cs</i>	0,08/2,4	0,04/2,2	0,08/2,2
<i>Cc</i>	0,03/3,8	0,03/3,9	0,05/3,9
$\Delta_P / \langle\langle P\rangle\rangle_s$, г/м ²			
<i>Cu hum</i>	Н	–0,05/88	–0,02/76
<i>Cu med/cong</i>	–0,04/780	–0,03/560	–0,02/460
<i>Cb calv</i>	Н	Н	–0,03/588
<i>Cb cap</i>	–0,03/1490	–0,06/1430	–0,03/1280
<i>Sc cuf</i>	0,03/78	–0,03/67	Н
<i>Sc und</i>	0,04/77	–0,03/72	0,02/58
<i>St</i>	–0,03/117	–0,07/83	Н
<i>Ns</i>	0,05/185	–0,03/208	–0,03/188
<i>As</i>	0,03/300	–0,03/337	–0,03/355
<i>Ac cuf</i>	Н	–0,03/199	Н
<i>Ac und</i>	Н	Н	0,04/62
<i>Ci sp</i>	Н	–0,02/486	Н
<i>Cs</i>	0,02/57	0,04/55	0,06/50
<i>Cc</i>	Н	Н	0,02/57

Примечание. «Н» — нейтральный тренд $\langle\tau\rangle_s$ или $\langle P\rangle_s$ при $|\Delta_\tau| < 0,02$ или $|\Delta_P| < 0,02$ соответственно.

В процессе изучения многолетней изменчивости характеристик полей однослойной облачности выявлено, что в 2010 и 2012 гг. наблюдались аномальные значения $n_s(\text{type})$, $\langle \tau \rangle_s$, $\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$ у некоторых разновидностей облаков в одной или нескольких широтных зонах Западной Сибири одновременно. На основании этого было выдвинуто предположение об увеличении вклада мезомасштабных процессов в формирование режима облачности над целевым регионом в периоды ослабления/усиления меридионального переноса на фоне блокирования западного переноса продолжительными антициклонами. Причем на фоне событий 2010 г. уменьшилась доля покрытия территории Западной Сибири волнистообразными облаками, а увеличилась — облачностью, образующейся под воздействием конвективных процессов. Более детальный анализ указанных явлений — перспективное направление развития настоящей работы. Полученные результаты могут рассматриваться в качестве актуального источника информации об однослойной облачности при решении задач климатологии и метеорологии, связанных с изучением рассматриваемого региона.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Stubenrauch C.J., Rossow W.B., Kinne S., Ackerman S., Cesana G., Chepfer H., Di Girolamo L., Getzewich B., Guignard A., Heidinger A., Maddux B.C., Menzel W.P., Minnis P., Pearl C., Platnick S., Poulsen C., Riedi J., Sun-Mack S., Walther A., Winker D., Zeng S., Zhao G. Assessment of global cloud datasets from satellites: Project and database initiated by the GEWEX Radiation Panel // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2013. V. 94, N 7. P. 1031–1049.
2. Чернокульский А.В., Мохов И.И. Сравнительный анализ характеристик глобальной и зональной облачности по различным спутниковым и наземным наблюдениям // *Исслед. Земли из космоса*. 2010. № 3. С. 12–29.
3. КН-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.
4. Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгало Ю.А., Кондратюк В.И., Кулешов Ю.В., Светлова Т.П., Суворов С.С., Тимофеев В.И. Атлас облаков. СПб.: Д'Арт, 2011. 248 с.
5. Облака и облачная атмосфера. Справочник / под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
6. Schiffer R.A., Rossow W.B. The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The first project of the World Climate Research Programme // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1983. V. 64, N 7. P. 779–784.
7. 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.
8. 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.
9. Комаров В.С., Ильин С.Н., Лавриненко А.В., Ломакина Н.Я., Горев Е.В., Нахтигало Д.П. Климатический режим нижней облачности над территорией Сибири и его современные изменения. Часть 1. Особенности режима нижней облачности // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 7. С. 579–583.
10. Комаров В.С., Нахтигало 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 атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 10. С. 895–898.
11. 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 атмосф. и океана*. 2015. Т. 28, № 1. С. 59–65; Komarov V.S., Matvienko G.G., Il'in S.N., Lomakina N.Ya. Estimate of local features of long-term variations in cloud cover over the territory of Siberia using results of its climatic zoning according to total and low-level cloud regimes // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 265–272.
12. Азаров А.С., Борисов Ю.А., Далеян Б.Г., Петров В.В., Синькевич А.А., Струнин М.А., Фомин Б.А., Хатматов В.Ч. Новые возможности в проведении исследований атмосферных процессов и мониторинга окружающей среды с использованием самолета-лаборатории Як-42Д «Росгидромет» // *Докл. Всерос. открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы*. Нальчик: Печатный двор, 2015. С. 48–58.
13. The Earth Observator // Land Surface Temperature Anomaly, 2000–2022. URL: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTAD_M (last access: 20.07.2022).
14. Харюткина Е.В., Логинов С.В., Усова Е.И., Мартынова Ю.В. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX — начале XXI веков // *Фундам. и прикл. климатол.* 2019. Т. 2. С. 45–65.
15. Chernokulsky A.V., Mokhov I.I., Nikitina N.G. Winter cloudiness variability over Northern Eurasia related to the Siberian High during 1966–2010 // *Environ. Res. Lett.* 2013. V. 8, N 4. P. 045012.
16. Мохов И.И., Чернокульский А.В., Осипов М.А. Центры действия атмосферы Северного и Южного полушарий: Особенности и изменчивость // *Метеорол. и гидрол.* 2020. № 11. С. 5–23.
17. Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14, № 6. С. 28–41.
18. Туткова Т.Б., Виноградова В.В. Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16, № 5. С. 310–323.
19. Barnes W.L., Pagano T.S., Salomonson V.V. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1 // *IEEE Trans. Geosci. Remote. V* 36, N 20. P. 1088–1100.
20. Скороходов А.В., Астафуров В.Г., Евсюткин Т.В. Применение статистических моделей текстуры изображений // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2013. V. 51. P. 3826–3852.

- ражений и физических параметров облаков для их классификации на спутниковых снимках MODIS // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 4. С. 43–58.
21. 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.
 22. Maddux B.C., Ackerman S.A., Platnick S. Viewing geometry dependencies in MODIS cloud products // J. Atmos. Ocean. Tech. V. 27. P. 1519–1528.
 23. Tapakis R., Charalambides A.G. Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review // Solar Energy. 2013. V. 95. P. 392–430.
 24. Мохов И.И. Особенности формирования летней жары 2010 г. на Европейской территории России в контексте общих изменений климата и его аномалий // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 709–716.
 25. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования // Метеорол. и гидрол. 2010. № 11. С. 5–19.
 26. 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, N 724. P. 3040–3056.
 27. 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.
 28. Матвеев Ю.Л., Матвеев Л.Т., Солдатенко С.А. Глобальное поле облачности. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 279 с.
 29. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорол. и гидрол. 2022. № 5. С. 27–41.

V.G. Astafurov, A.V. Skorokhodov, K.V. Kuryanovich. Variability of parameters of single-layer cloud fields over Western Siberia in summer for the period from 2001 to 2019 according to MODIS data.

We present the results of the assessment of multiyear variability for the parameters of single-layer cloud fields over the territory of Western Siberia in summer in 2001 to 2019 based on MODIS data. The seasonal average proportion of coverage by single-layer clouds of different types and values of their features are determined based on the results of cloud classification from summer (June, July, August) daily satellite images of the target region. Parameters of single-layer clouds are considered for three latitudinal zones of Western Siberia: southern ($<60^\circ\text{N}$), transitional ($60\text{--}65^\circ\text{N}$), and northern ($>65^\circ\text{N}$). We found linear trends of the proportion of coverage by different single-layer cloud types and of their parameters: optical thickness, effective particle radius, waterpath, and cloud top height. A discussion of the results is given. The greatest variability of the physical parameters considered in this work is characteristic of the vertical development and low-level clouds in the northern and transition zone of the target region. The effect of anomalous blocking anticyclones on some features of different cloud types in the considered latitudinal zones of Western Siberia is shown.