

УДК 551.576.36

Изменчивость характеристик однослойных облачных полей над Западной Сибирью в зимний период 2001–2019 гг. по 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 Зueva, 1*

Поступила в редакцию 24.05.2023;
после доработки 03.08.2023;
принята к печати 19.08.2023

Представлены результаты оценки многолетней изменчивости характеристик полей однослойной облачности над территорией Западной Сибири в зимний период 2001–2019 гг. на основе спутниковых данных MODIS. Основная идея методики анализа заключается в использовании результатов распознавания 11 типов облаков по ежедневным зимним (декабрь, январь, февраль) изображениям из космоса, полученным в дневное время суток. Характеристики однослойной облачности рассмотрены для трех широтных зон Западной Сибири: южной ($< 60^\circ$ с.ш.), переходной ($60\text{--}65^\circ$ с.ш.) и северной ($> 65^\circ$ с.ш.). Найдены параметры линейных трендов следующих характеристик различных типов облаков: доля покрытия ими целевой территории, оптическая толщина, эффективный радиус частиц, водозапас и высота их верхней границы. Обсуждаются результаты сопоставления полученных данных с информацией из ежегодных оценочных докладов Росгидромета. Предложены гипотезы о причинах аномальных значений временных рядов характеристик различных типов облаков в исследуемых широтных зонах Западной Сибири зимой.

Ключевые слова: ряды, Западная Сибирь, многолетние тренды, спутниковые данные, характеристики облаков; time series, Western Siberia, long-term trend, satellite data, cloud parameter.

Введение

В [1] нами была проанализирована многолетняя изменчивость различных характеристик полей однослойной облачности над Западной Сибирью в летний период 2001–2019 гг. по спутниковым данным MODIS, полученным в дневное время суток. Построены временные ряды и определены тренды некоторых параметров различных типов облаков, а также выдвинуты гипотезы относительно причин их аномальных значений. Летом над Западной Сибирью наблюдается преимущественно жидкокапельная облачность, а зимой кристаллическая [2]. При этом с июня по август разница в количестве облаков с различным фазовым составом достигает 30%, а с декабря по февраль — 50%. В первую очередь это связано с различными температурными режимами и преобладающими процессами общей циркуляции атмосферы в зимнее и летнее время в регионе [3–5]. Зимой климат Западной Сибири обусловлен формированием Азиатского (Сибирского) антициклона, способствующего выхолаживанию подстилающей поверхности и образованию кристаллической облачности, в том числе нижнего яруса. В редких случаях

на территорию исследуемого региона проникают влажный атлантический воздух (преимущественно в высокие широты) и сухие среднеазиатские воздушные массы [6]. Поэтому характеристики одного и того же типа облачности зимой и летом существенно отличаются [7].

В зимний период 1994–2010 гг. на всей территории РФ наблюдалось похолодание, в частности, на юге Западной Сибири до $-2^\circ\text{C}/10$ лет [8]. В последующее десятилетие и по настоящее время здесь регистрируются тенденция потепления зим и увеличение числа температурных аномалий (особенно в российском секторе Арктики), которые могут быть причиной значительной изменчивости характеристик различных разновидностей облаков. Поэтому изучение зимнего режима облачности над Западной Сибирью в качестве маркера происходящих здесь климатических изменений за продолжительный период времени представляет несомненный научный интерес.

Целью данной работы является анализ многолетней изменчивости характеристик полей однослойной облачности над Западной Сибирью в зимний период 2001–2019 гг. по спутниковым данным MODIS.

Исходные данные

В настоящей работе, как и в [1], рассматриваются три широтные зоны Западной Сибири: южная

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

(< 60° с.ш.), переходная (60–65° с.ш.) и северная (> 65° с.ш.). В качестве основного источника информации о параметрах облачности использовались ежедневные данные спектрорадиометра MODIS, полученные с 2001 по 2019 г. в зимнее время (декабрь, январь и февраль). Спутники Terra и Aqua, на борту которых установлен MODIS, пересекают экватор в рассматриваемом часовом поясе в 03:30 и 06:30 UTC соответственно. В летнее время это позволяет охватывать весь целевой регион одним-двумя последовательными снимками при углах отклонения от надира не более 40°, что исключает из рассмотрения искажения на краях изображений, обусловленные геометрией съемки [9]. Однако зимой над высокими широтами Западной Сибири наблюдается полярная ночь, что делает невозможным восстановление некоторых параметров облачности. Поэтому в данной работе для корректного сопоставления результатов анализа многолетней изменчивости характеристик облаков над выбранными зонами исследуемого региона рассматриваются спутниковые данные, полученные в феврале, а также за все три зимних месяца в целом, но только для юга Западной Сибири.

В табл. 1 представлена зимняя объединенная классификация облачности, предложенная нами в [10], с учетом метеорологического стандарта ВМО, возможностей MODIS и информации о повторяемости типов облачности по архивным данным наземных метеостанций Западной Сибири из [11]. Из рассмотрения были исключены разновидности облаков вертикального развития вследствие низкой доли покрытия ими территории Западной Сибири в феврале 2001–2019 гг., которая варьируется от 0,1% для кучево-дождевых волосатых облаков в северной зоне до 0,9% для кучево-дождевых лысых облаков в переходной, что было определено нами в рамках настоящей работы.

Таблица 1

Объединенная зимняя классификация облачности

№	Название	Обозначение
<i>Облака нижнего яруса</i>		
1	Слоисто-кучевые кучевообразные	<i>Sc cuf</i>
2	Слоисто-кучевые волнистообразные	<i>Sc und</i>
3	Слоистые	<i>St</i>
4	Слоисто-дождевые	<i>Ns</i>
<i>Облака среднего яруса</i>		
5	Высокослоистые	<i>As</i>
6	Высококучевые кучевообразные	<i>Ac cuf</i>
7	Высококучевые волнистообразные	<i>Ac und</i>
<i>Облака верхнего яруса</i>		
8	Перистые нитевидные	<i>Ci fib</i>
9	Перистые плотные	<i>Ci sp</i>
10	Перисто-слоистые	<i>Cs</i>
11	Перисто-кучевые	<i>Cc</i>

В работе использовались следующие продукты спутниковой съемки MODIS: изображения в видимом диапазоне спектра (0,62–0,67 мкм) с пространственным разрешением 250 м (MOD02QKM и MYD02QKM), ежедневные продукты, содержа-

щие информацию о параметрах облачности с пространственным разрешением 1000 м (MOD06_L2 и MYD06_L2) [12, 13], а также файлы геопривязки MOD03 и MYD03 с пространственным разрешением 250 м. Рассматривались такие характеристики однослойных облаков, как оптическая толщина (τ), эффективный радиус частиц ($r_{эфф}$), водозапас (P) и высота верхней границы облачности ($h_{вг}$). Кроме этого определялась средняя доля покрытия однослойными облаками различных типов $n_s(type)$ территорий исследуемых широтных зон Западной Сибири.

Решение о наличии облачности в одном или нескольких ярусах одновременно принималось на основе значений флага Cloud_Multi_Layer_Flag в продуктах MOD06_L2 и MYD06_L2 [12]. Установлено, что для февраля доля однослойных облаков в общей облачности составляет 52%. Отметим, что операционный алгоритм MODIS разделяет облака на однослойные и многослойные с погрешностью около 10% по сравнению с синхронными данными лидара CALIOP и радара CPR на спутниках CALIPSO и CloudSat [14]. При этом в большей степени недооцениваются многослойные облака в случаях наблюдения тонких перистых облаков с $\tau < 0,4$ над другими типами и облаков вертикального развития, расположенных в нескольких ярусах одновременно. В настоящей работе этой погрешностью мы пренебрегаем, исключая из рассмотрения конвективную облачность.

Методика анализа

Основная суть методики анализа изменчивости характеристик полей однослойной облачности над рассматриваемыми широтными зонами Западной Сибири заключается в выполнении процедуры распознавания 11 типов облаков из табл. 1 на ежедневных спутниковых снимках MODIS и использовании ее результатов. Процедура классификации облачности осуществлялась с помощью алгоритма, предложенного в [15] и основанного на применении нечеткой нейронной сети. При этом использовались зимние региональные статистические модели параметров облачности из [10]. Данный классификатор позволяет распознавать тип облачности на спутниковых снимках, полученных в светлое время суток при наличии снежного покрова, с вероятностью 0,79. Несмотря на то что эффективность указанного алгоритма несколько ниже того, что использовался в [1] для летних месяцев, он позволяет выделять текстурные различия между подтипами основных форм облачности на фоне снега. Результатом распознавания является изображение MODIS, перекрашенное в псевдоцвета, каждый из которых соответствует конкретной разновидности облаков.

На полученные после классификации спутниковые снимки накладываются границы рассматриваемых в работе широтных зон Западной Сибири без учета положения линии солнечного терминатора. В области изображения с низким уровнем освещения (в условиях полярной ночи) значения некоторых

характеристик облаков в продуктах MOD06_L2 и MYD06_L2 не определены и поэтому исключаются из дальнейших расчетов. При этом размер широтных зон пересчитывается для каждого снимка MODIS в зависимости от положения линии солнечного терминатора. После обработки всех данных для каждой широтной зоны находятся оценки среднесезонной доли их покрытия однослойными облаками различных типов 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 — число обработанных изображений за февраль или три зимних месяца (только для южной зоны) каждого года, которое равно 28(29) или 90(91) соответственно; $S_{\text{type},i}$ — число пикселей в зоне, принадлежащих данной разновидности облаков в i -й день; S_i — размер зоны в пикселях. Подобным образом на основе данных тематических продуктов MOD06_L2 и MYD06_L2 вычислялись оценки среднесезонных значений исследуемых параметров различных типов облачности $\langle \tau \rangle_s$, $\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$ для каждой широтной зоны Западной Сибири. На заключительном этапе строились временные ряды и находились многолетние тренды рассматриваемых в работе параметров облаков.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 показаны многолетние ряды значений $n_s(\text{type})$ для наиболее распространенных типов облаков из табл. 1 в Западной Сибири в феврале, а также за весь зимний сезон для южной зоны. Анализируя полученные результаты и сравнивая их с данными ежегодных оценочных докладов Росгидромета [16–21], можно сделать ряд выводов и предположений. Начиная с 2010 г. наблюдается рост доли покрытия всей территории Западной Сибири слоистыми облаками (St) в феврале (а для южной зоны зимой в целом). Эти изменения происходят на фоне завершения периода понижения температуры приземного слоя в зимнее время (1994–2010 гг.), которое в рассматриваемых широтных зонах достигало $-2^\circ\text{C}/10$ лет, и перехода к тенденции потепления [8]. Для слоисто-дождевой облачности также наблюдается рост значений $n_s(Ns)$ в феврале во всех зонах (но для юга Западной Сибири в зимний сезон они уменьшаются). При этом доля облаков Ns для северной зоны в феврале ниже, чем для двух других зон, где она практически одинаковая, учитывая совпадающие линии тренда. Высококучистая облачность характеризуется отрицательными трендами $n_s(As)$ в феврале в северной и переходной зонах и положительным в южной. Однако сезонная доля покрытия облаками As в южной зоне сокращается. Для перисто-слоистой облачности (Cs) характерны нейтральные

тренды $n_s(Cs)$ как в феврале для всех трех зон, так и за всю зиму для юга Западной Сибири.

Из рис. 1 (цв. вкладка) видно, что большее количество положительных аномалий n_s в феврале наблюдается в южной и переходной зонах по сравнению с северной. Так, высокие значения $n_s(St)$ регистрировались в 2012 г. в южной зоне, а в 2011, 2012 и 2014 гг. в переходной, $n_s(Ns)$ — в 2002, 2008 и 2016 гг. и в южной, и в переходной зонах одновременно, $n_s(As)$ — в 2014 г. в южной и в 2017 г. в переходной, $n_s(Cs)$ — в 2015 г. в переходной. Для северной зоны наиболее значительная положительная аномалия зарегистрирована в 2006 г. для $n_s(Cs)$. Усредненная за три месяца доля покрытия рассматриваемыми на рис. 1 облаками в южной зоне имеет более гладкий временной ход. Здесь в явном виде выделяются только аномально низкие значения $n_s(Ns)$ с 2010 по 2012 г. Также из рис. 1 видно, что отрицательные аномалии n_s рассматриваемых типов облачности в феврале практически отсутствуют, за исключением низких значений $n_s(As)$ в 2012 г. в переходной и южной зонах.

Анализируя ежегодные отчеты Росгидромета, можно выделить ряд событий, наблюдавшихся в годы с аномальными значениями n_s в феврале в каждой из рассматриваемых зон, а для южной — еще и за весь зимний сезон. В 2002 и 2008 гг. на всей территории Западной Сибири, за исключением ее северной части, регистрировались положительные аномалии температуры приземного слоя от 6 до 11°C . Причем основной очаг тепла пришелся на южную зону, куда проникли воздушные массы с Казахстана. В январе 2006 г. в центре Западной Сибири под влиянием Азиатского (Сибирского) антициклона сформировался очаг холода, находившийся здесь более 20 дней, что предопределило низкие значения n_s основных осадкодержущих облаков St и Ns в южной и переходной зонах в феврале. На северную же зону воздействовал полярный циклон. Этим может быть обусловлена высокая доля ее покрытия облаками Cs , которые, как правило, и образуются в тылу циклона [16].

В феврале 2010 г. (и зимой в целом) над всей территорией Западной Сибири наблюдались существенные отрицательные температурные аномалии со среднемесячным значением $-6,53^\circ\text{C}$ по всему региону, а среднесуточными — до -22°C над некоторыми его областями. Основной причиной этого было проникновение в Западную Сибирь мощного гребня Сибирского максимума, что привело к преобладанию здесь малооблачной погоды [18]. Высокие значения $n_s(St)$ в переходной зоне в феврале 2011 г. наблюдались на фоне проникновения сюда теплых воздушных масс, основной очаг которых находился в Иркутской области, где среднемесячная аномалия температуры превышала 6°C [19]. В феврале 2012 г. в Западной Сибири сформировались один очаг тепла в северной зоне из-за влияния Атлантического циклона и один очаг холода на юге под воздействием гребня Сибирского максимума. Предположительно этим обусловлены аномальные значения $n_s(St)$ и $n_s(As)$ в южной и переходной

Таблица 2

Оценки характеристик линейного тренда $n_s(\text{type})$ различных типов облачности и многолетние средние $\langle n_s(\text{type}) \rangle_{\Delta t}$ за февраль 2001–2019 гг.

Тип облачности	$\Delta_n / \langle n_s \rangle, \%$		
	Северная зона	Переходная зона	Южная зона (зимний сезон)
<i>St</i>	0,77/2,3	0,53/2,9	0,40/2,6 (0,30/2,7)
<i>Ns</i>	0,24/6,1	0,09/8,5	0,09/8,4 (–0,12/10,1)
<i>As</i>	–0,25/8,9	–0,08/7,9	0,11/7,3 (–0,09/7,3)
<i>Ac cuf</i>	–	–0,07/2,4	– (–)
<i>Ac und</i>	–	0,07/4,8	Н/3,3 (–0,05/3,1)
<i>Ci sp</i>	–	–	–0,19/2,2 (0,07/2,2)
<i>Cs</i>	–	0,02/2,0	– (–)

Примечание. «–» – низкая повторяемость, если $\langle n_s \rangle < 2\%$; «Н» – нейтральный тренд повторяемости, если $|\Delta_n| < 0,02$.

зонах [20]. В феврале 2014 г. в переходной зоне сформировался очаг холода с незначительными температурными аномалиями из-за смещения Сибирского максимума на юго-запад, где регистрировались аномальные значения $n_s(St)$ и $n_s(As)$. Зима 2016 г. была экстремально теплой на всей территории Российской Федерации, в феврале наблюдался второй после 2021 г. исторический максимум температуры в Западной Сибири – 8,93 °С, из-за меридионального переноса сюда атлантических воздушных масс. Это поспособствовало образованию плотной осадкосодержащей облачности, что подтверждается полученными нами результатами (рис. 1, б). Кроме этого, высокие значения $n_s(Cs)$ в феврале 2015 г. в переходной зоне зарегистрированы на фоне сформированного здесь очага тепла в результате циклонической деятельности с температурными аномалиями, достигающими 8 °С.

Таким образом, аномальные значения n_s рассматриваемых типов облачности над Западной Сибирью наблюдались на фоне экстремальных проявлений Азиатского (Сибирского) антициклона, глубокого проникновения и меридионального переноса атлантических циклонов, а в более редких случаях – перемещения в Западную Сибирь теплых среднеазиатских воздушных масс. При этом положительная обратная связь между облачностью и Азиатским (Сибирским) максимумом подтверждается результатами из [22]. Так, усиление интенсивности этого антициклона на 1 гПа (на уровне моря) приводит к увеличению числа безоблачных дней за зиму на единицу в регионах его нахождения. Однако детальный анализ аномальных изменений режима облаков в выделенные годы требует привлечения дополнительной информации о полях давления, вертикальных профилях температуры и влажности воздуха, а также скорости и направлении ветра.

В табл. 2 приведены оценки характеристик линейного тренда относительной доли покрытия подстилающей поверхности различного типа однослойной облачностью в феврале для всех трех широтных зон, а для южной зоны еще и за весь зимний сезон:

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

где a_n – угловые коэффициенты линейного тренда, найденные методом наименьших квадратов на основе многолетних данных $n_s(\text{type})$. Для сопоставления с данными Росгидромета принято $\Delta t = 10$ лет. Типы облачности из табл. 1, не включенные в табл. 2, имеют низкие значения $n_s(\text{type})$ или нейтральный тренд при $|\Delta_n| < 0,02$ во всех трех рассматриваемых зонах Западной Сибири одновременно.

Из табл. 2 видно, что прирост $n_s(St)$ – наиболее интенсивный по всей Западной Сибири в феврале 2001–2019 гг., а в южной зоне – за всю зиму. Также наблюдается увеличение количества облаков *Ns* в феврале по всему целевому региону. Однако в зимний сезон в целом $n_s(Ns)$ в южной зоне сокращается. Уменьшение доли покрытия облаками среднего яруса наблюдается в северной и пере-

ходной зонах, а увеличение этого показателя – на юге Западной Сибири. При этом количество выпавших осадков с 1976 по 2022 г. над рассматриваемой территорией меняется лишь в пределах $\pm 10\%$ нормы/10 лет [8]. Можно предположить, что сокращение числа основных осадкосодержащих облаков среднего яруса *As* компенсируется увеличением *St* и *Ns*.

Отметим, что найденные нами тренды $n_s(Ns)$ и $n_s(St)$ не противоречат приведенным в [23] результатам для нижней облачности за 2001–2013 гг. по данным наземных метеостанций Западной Сибири. Интересной особенностью является уменьшение количества *Ac cuf* и увеличение *Ac und* в переходной зоне. Эти облака, несмотря на свое сходство, образуются под воздействием различных механизмов (конвекции и внутренних волн соответственно). Облака же верхнего яруса в целом имеют тенденцию к сокращению в феврале по всей Западной Сибири за счет облачности *Ci sp*. При этом в южной зоне $n_s(Ci sp)$ зимой увеличивается.

Таким образом, режим облачности претерпевает наиболее интенсивные изменения в феврале на севере Западной Сибири. Одной из причин этого может быть более быстрый рост среднесезонной температуры приземного слоя, который в настоящее время достигает здесь 1 °С/10 лет [19].

На рис. 2 (цв. вкладка) показаны временные ряды $\langle \tau \rangle_s$ и $\langle r_{эфф} \rangle_s$ для *Ns*, а также $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{вг} \rangle_s$ для *St* в феврале 2001–2019 гг. над различными широтными зонами Западной Сибири, а для южной зоны еще и за весь зимний сезон. Широтные отличия этих параметров в феврале проявляются в меньшей степени, чем в летний период [1]. При этом наблюдается больший контраст значений перечисленных выше характеристик между северной и переходной зонами, чем между переходной и южной. В северной и переходной зонах регистрируется рост значений $\langle \tau(Ns) \rangle_s$ с положительными аномалиями в 2002, 2012 и 2016 гг., а в южной – их уменьшение как в феврале, так и зимой в целом (рис. 2, а). Отметим, что временные ряды $\langle \tau(Ns) \rangle_s$ в переходной и южной зонах хорошо согласуются между собой.

Значения $\langle r_{\text{эфф}}(Ns) \rangle_s$ в феврале 2001–2019 гг. убывают в целом по всей Западной Сибири с положительными аномалиями в 2010 г. и отрицательными в 2002 и 2016 гг. (рис. 2, б). Причем в северной зоне сокращение происходит интенсивнее, чем в переходной и южной зонах. Однако зимой значения $\langle r_{\text{эфф}}(Ns) \rangle_s$ в южной зоне увеличиваются. Аналогичная тенденция к сокращению $r_{\text{эфф}}$ за февраль 2001–2019 гг. наблюдается у облаков *St*, *As* и *Cs* по всей Западной Сибири. Таким образом, можно предположить, что уменьшаются размеры кристаллов льда, из которых облачность и состоит, или увеличивается доля жидкокапельных облаков.

В северной зоне в феврале 2001–2019 гг. наблюдаются более высокие значения $\langle P(St) \rangle_s$ по сравнению с остальными зонами (рис. 2, в). Предположительно причиной этого является доминирование здесь в рассматриваемый сезон атлантических и полярных циклонов, являющихся одним из основных механизмов образования данного типа облачности [11]. При этом водозапас облаков *St* интенсивно сокращается с положительной аномалией в 2010 г. и отрицательными в 2004, 2014 и 2016 гг. Значения $\langle P(St) \rangle_s$ в феврале в переходной и южной зонах (а для последней и за весь зимний сезон) за рассматриваемый период времени практически не изменяются, существенных выбросов не наблюдается.

Значения $\langle h_{\text{ВГ}}(St) \rangle_s$ сокращаются в феврале 2001–2019 гг. по всей Западной Сибири и зимой в южной зоне (рис. 2, г). При этом положительные аномалии $h_{\text{ВГ}}(St)$ наблюдались в 2002, 2007 и 2017 гг., а отрицательные — в 2006, 2012 и 2014 гг. Отметим, что временные ряды $\langle h_{\text{ВГ}}(St) \rangle_s$ для рассматриваемых широтных зон хорошо согласуются между собой, а также с данными за всю зиму для южной зоны в отличие от других параметров на рис. 2. При этом линии трендов высоты верхней границы слоистых облаков практически совпадают. Ярко выраженная тенденция к уменьшению $\langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$ в феврале наблюдается только у *Ns* и *As* в северной зоне, а в южной (в том числе и зимой) отмечен небольшой прирост значений данного параметра по всем типам облачности в целом.

Таким образом, аномальные февральские значения $\langle \tau \rangle_s$, $\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$ наблюдались в те же годы, что и для n_s , а также 2007 и 2017 гг. для *St*, так как в эти годы в Западной Сибири всю зиму было тепло, а влияние Сибирского максимума было минимальным [17]. Отсюда можно сделать вывод, что экстремальные проявления циркуляционных процессов в Западной Сибири влияют не только на режим облачности, но и на значения ее характеристик.

В табл. 3 приведены оценки относительной многолетней изменчивости $\langle \tau \rangle_s$, $\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$ различных типов облачности над исследуемыми широтными зонами Западной Сибири в феврале, а для южной зоны еще и за весь зимний сезон. Значения Δ_τ , Δ_r , Δ_P и Δ_h рассчитываются аналогично Δ_n ; $\langle \cdot \rangle_s$ обозначает последовательные усреднения по месяцу (сезону) и многолетнему ряду наблюдений.

Таблица 3
Оценки характеристик линейного тренда $\langle \tau \rangle_s$, $\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$ различных типов облачности и многолетние средние $\langle \tau \rangle_s$, $\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, $\langle P \rangle_s$ и $\langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$ за февраль (сезон) 2001–2019 гг.

Тип облачности	Северная зона	Переходная зона	Южная зона (зимний сезон)
$\Delta_\tau / \langle \tau \rangle_s$			
<i>St</i>	0,12/16	0,08/9,0	–0,10/8,8 (–0,05/13)
<i>Ns</i>	0,15/13	0,13/9,1	–0,03 9,9 (–0,09/12)
<i>As</i>	0,08/7,7	0,12/5,5	0,03/5,4 (–0,02/6,0)
<i>Ac cuf</i>	–	0,13/9,9	– (–)
<i>Ac und</i>	–	0,05/5,8	H/5,2 (–0,07/7,7)
<i>Ci sp</i>	–	–	–0,02/5,7 (–0,03/7,1)
<i>Cs</i>	–	–0,02/4,0	– (–)
$\Delta_r / \langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$, мкм			
<i>St</i>	–0,16/25	–0,08/25	H/26 (H/3)
<i>Ns</i>	–0,12/29	–0,08/28	H/27 (0,03/25)
<i>As</i>	–0,06/37	–0,02/39	H/41 (H/38)
<i>Ac cuf</i>	–	–0,05/34	– (–)
<i>Ac und</i>	–	–0,04/33	–0,02/33 (H/31)
<i>Cs</i>	–	–0,03/34	– (–)
$\Delta_P / \langle P \rangle_s$, г/м ²			
<i>St</i>	–0,22/567	–0,10/179	–0,04/148 (–0,06/258)
<i>Ns</i>	0,03/315	–0,02/169	–0,06/135 (–0,05/212)
<i>As</i>	0,06/459	0,15/237	H/202 (–0,06/284)
<i>Ac cuf</i>	–	0,04/131	– (–)
<i>Ac und</i>	–	H/83	–0,02/70 (–0,04/96)
<i>Ci sp</i>	–	–	–0,04/112 (–0,03/132)
<i>Cs</i>	–	–0,03/77	– (–)
$\Delta_h / \langle h_{\text{ВГ}} \rangle_s$, м			
<i>St</i>	–0,24/476	–0,30/463	–0,38/463 (–0,30/434)
<i>Ns</i>	–0,03/3618	H/3411	0,03/3363 (0,03/4184)
<i>As</i>	–0,02/3956	H/4032	H/4099 (H/4185)
<i>Ac cuf</i>	–	H/3848	–
<i>Ac und</i>	–	H/3665	H/3568 (0,02/3775)
<i>Ci sp</i>	–	–	0,02/7509 (0,03/7555)
<i>Cs</i>	–	H/7346	–

Из табл. 3 видно, что за рассматриваемый период интенсивно увеличивается оптическая толщина облаков нижнего и среднего ярусов в северной и переходной зонах. В южной зоне $\langle \tau \rangle_s$ в феврале и зимой в целом у этих типов облачности характеризуется отрицательным трендом. У облаков верхнего яруса оптическая толщина незначительно уменьшается по всей Западной Сибири за счет *Ci sp* в южной зоне и *Cs* в переходной. Эффективный радиус частиц сокращается у всех типов облачности во всех широтных зонах в феврале, а в южной зоне зимой увеличивается только у облаков *Ns*. При этом наибольший тренд $\langle r_{\text{эфф}} \rangle_s$ наблюдается в северной зоне. Водозапас облаков нижнего яруса в феврале по всей Западной Сибири уменьшается, а среднего — растет. В южной зоне в феврале и за всю зиму $\langle P \rangle_s$ имеет отрицательный тренд. Наиболее интенсивные изменения претерпевает водозапас облаков *St* в северной зоне и *As* в переходной. У облаков верхнего яруса $\langle P \rangle_s$ характеризуется отрицательным трендом как в феврале во всех зонах, так и в южной за всю зиму.

Высота верхней границы облаков нижнего яруса в феврале 2001–2019 гг. по всей Западной Сибири уменьшается, среднего яруса — остается практически без изменений, а верхнего — растет. Причем наиболее значительным (особенно в южной зоне) трендом характеризуются облака *St*.

Таким образом, по аналогии с n_s самые значительные изменения характеристик однослойной облачности в феврале происходят в северной зоне, затем в переходной и в меньшей степени выражены в южной.

Заключение

Основным результатом работы являются оценки многолетней изменчивости характеристик различных разновидностей облаков над отдельными широтными зонами Западной Сибири в зимний период 2001–2019 гг. На их основе выделены особенности изменения режима однослойной облачности. Так, выявлено увеличение доли покрытия территории Западной Сибири в феврале (а для южной зоны еще и за весь зимний период) основными осадкосодержащими облаками нижнего яруса *Ns* и *St*. Для облаков среднего яруса в феврале в северной и переходной зонах характерен отрицательный тренд n_s , а в южной — положительный (но для зимы в целом отрицательный). Доля облаков верхнего яруса по всей Западной Сибири в феврале убывает, а в южной зоне за весь сезон возрастает. Наиболее распространенными однослойными облаками в исследуемом регионе в феврале, а в южной зоне и зимой, остаются слоисто-дождевые и высокослоистые облака.

В феврале 2001–2019 гг. наблюдается увеличение оптической толщины облаков в северной и переходной зонах и уменьшение данного параметра в южной (в том числе и за всю зиму). Эффективный радиус частиц убывает у всех типов облачности по всей Западной Сибири. Можно предположить, что уменьшаются и размеры кристаллов льда, из которых эти облака состоят. Водозапас облаков нижнего яруса убывает, а среднего — растет. С учетом значений n_s и их динамики можно предположить, что основными осадкосодержащими однослойными облаками в феврале над всей Западной Сибирью в дальнейшем станут *As*, а не *St* и *Ns*. Высота верхней границы в феврале за рассматриваемый период убывает у облаков нижнего яруса, остается неизменной у облаков среднего яруса и незначительно увеличивается у облаков верхнего яруса по всей Западной Сибири.

Исследуемые параметры облачности сильнее изменяются в северной зоне по сравнению с двумя остальными, что предположительно может быть связано с более высокой скоростью увеличения температуры приземного слоя здесь и сокращением площади многолетнего морского льда [24].

На основе результатов анализа временных рядов рассматриваемых в работе параметров облачности определены годы, в которые регистрировалось наибольшее число их аномальных значений над раз-

личными широтными зонами Западной Сибири в феврале (а для южной еще и за весь сезон): 2002, 2010, 2012, 2014 и 2016 гг. Оценочные доклады Росгидромета позволили определить события, на фоне которых эти аномалии наблюдались. Результаты сопоставления этой информации дают основание предполагать, что аномальные значения характеристик облаков обусловлены экстремальными проявлениями Азиатского (Сибирского) антициклона, глубоким проникновением и меридиональным переносом атлантических циклонов, а в более редких случаях — перемещением сюда теплых среднеазиатских воздушных масс. Перспективным направлением дальнейшей работы является изучение механизмов влияния этих процессов на параметры облачности с привлечением дополнительной информации о полях давления, вертикальных профилях температуры воздуха, его влажности, скорости и направления ветра за февраль перечисленных выше годов, как это сделано, например, в [25] по данным наземных метеостанций или в [26] по данным нескольких реанализов.

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

Список литературы

1. Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Курьянович К.В. Изменчивость характеристик однослойных облачных полей над Западной Сибирью в летнее время за период с 2001 по 2019 г. по спутниковым данным MODIS // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 3. С. 188–195; 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, N 4. P. 329–336.
2. King M.D., Platnick S.A., 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.
3. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976–2004 гг. // Метеорол. и гидрол. 2007. № 5. С. 28–36.
4. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Особенности циклогенеза над территорией западной Сибири за период 1976–2015 гг. // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2017. № 364. С. 81–92.
5. 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.
6. Дзердзеевский Б.Л. Сопоставление характеристик атмосферной циркуляции над Северным полушарием и его секторами // Материалы метеорологических исследований. М.: ИГ АН СССР и Междувед. Геофиз. Комитета при Президиуме АН СССР, 1970. С. 7–14.
7. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 234 с.
8. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2023. 104 с.

9. 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. 1998. V. 36, N 20. P. 1088–1100.
10. Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Мусиенко О.П., Курьянович К.В. Статистическая модель текстуры изображений и физических параметров облачности в периоды залегания снежного покрова на территории Российской Федерации по данным MODIS // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 537–541.
11. Облака и облачная атмосфера. Справочник / под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
12. Platnick S., Meyer K.G., King M.D., Wind G., Amarasinghe N., Marchant B., Arnold G.T., Zhang Z., Hubanks P.A., Robert E., Holz R.E., Yang P., Ridgway W.L., Jérôme Riedi J. The MODIS cloud optical and microphysical products: Collection 6 updates and examples from Terra and Aqua // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2017. V. 55, N 1. P. 502–525.
13. Hubanks P.A., King M.D., Platnick S.A., Pincus R. MODIS atmosphere L3 gridded product. Algorithm theoretical basis document. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 2008. 123 p.
14. Marchant B., Platnick S., Meyer K., Wind G. Evaluation of the MODIS Collection 6 multilayer cloud detection algorithm through comparisons with CloudSat Cloud Profiling Radar and CALIPSO CALIOP products // Atmos. Meas. Tech. 2020. V. 13. P. 3263–3275.
15. Astafurov V.G., Skorokhodov A.V., Musienko O.P., Kuriyanovich K.V. Classification of cloudiness from MODIS satellite data using regional statistical models for image texture and physical parameters of cloudiness during periods with snow cover // Proc. SPIE. 2018. 10833. DOI: 10.1117/12.2504068.
16. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2006 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2007. 20 с.
17. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2007 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2008. 35 с.
18. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2010 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2011. 66 с.
19. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2011 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2012. 83 с.
20. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2012 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2013. 86 с.
21. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Изд-во Росгидромета, 2023. 70 с.
22. 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. P. 045012.
23. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломкина 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.
24. Борзенкова И.И., Еришова А.А., Жильцова Е.Л., Шаповалова К.О. Морской лед Арктического бассейна в свете современных и прошлых климатических изменений // Лед и снег. 2021. Т. 61, № 4. С. 533–546.
25. Sun B., Groisman P.Y., Bradley R.S., Keimig F.T. Temporal changes in the observed relationship between cloud cover and surface air temperature // J. Clim. 2000. V. 13. P. 4341–4357.
26. Sfocă L., Beck C., Nita A-I., Voiculescu M., Birsan M.-V., Philipp A. Cloud cover changes driven by atmospheric circulation in Europe during the last decades // Int. J. Climatol. 2022. V. 41. P. E2211–E2230.

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

We estimate the long-term variability of the parameters of single-layer cloud fields over the territory of Western Siberia in winter for the period from 2001 to 2019 based on MODIS data. The main idea of the applied method is to use the results of recognition of 11 cloud types from daily winter (December, January, and February) daytime satellite images. Features 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 for the following parameters of different cloud types: the coverage fraction of the target zones, optical thickness, effective particle radius, waterpath, and top height. The paper discusses the results of comparing the data we obtained with information from the annual Roshydromet assessment reports. We propose hypotheses about the reasons for the anomalous parameter values in the time series for different cloud types in the latitudinal zones of Western Siberia under study in winter.

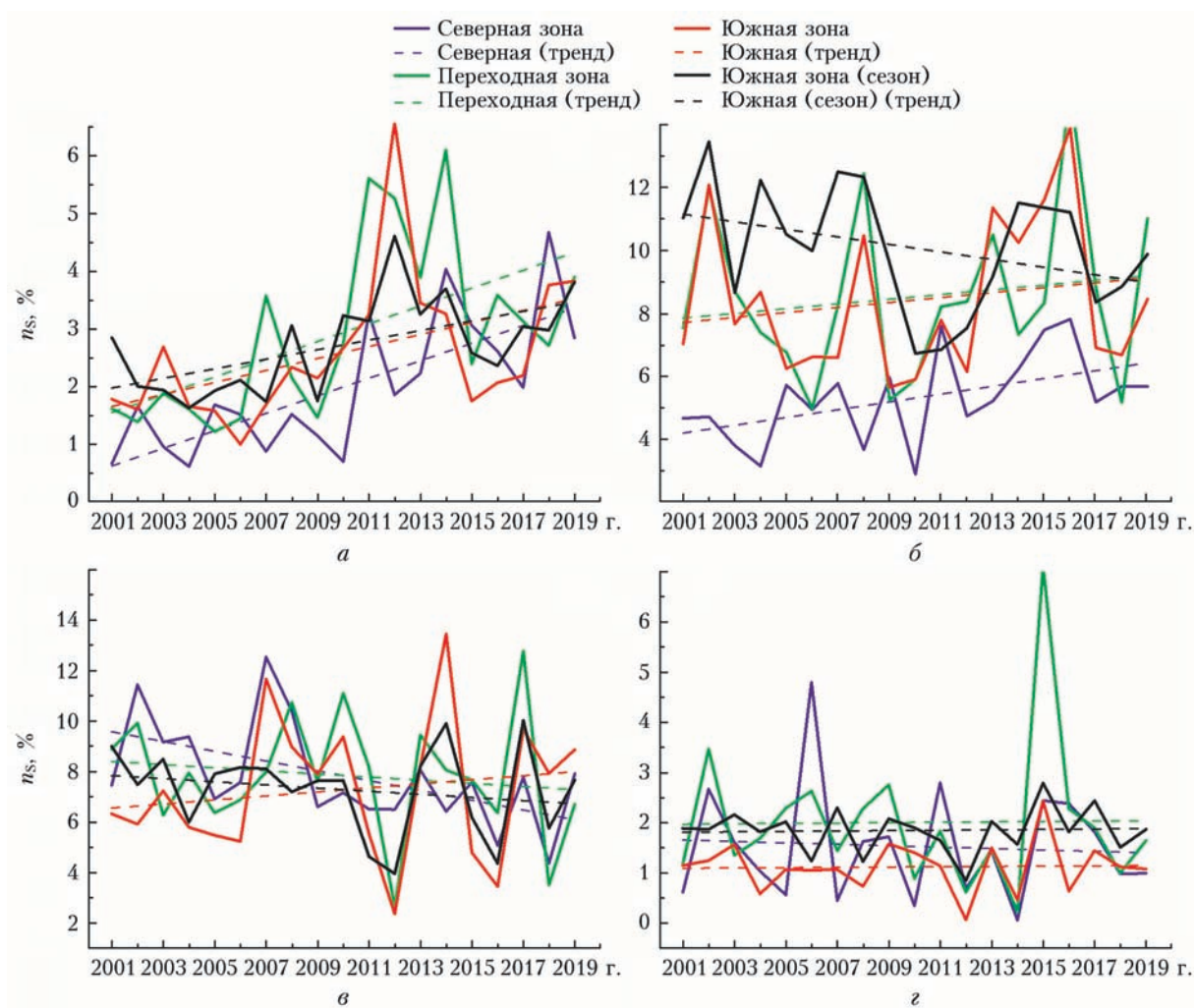


Рис. 1. Временные ряды средней доли покрытия облаками различных типов исследуемых широтных зон Западной Сибири в феврале, а для южной зоны еще и за весь зимний сезон: *a* – *St*; *б* – *Ns*; *в* – *As*; *г* – *Cs*

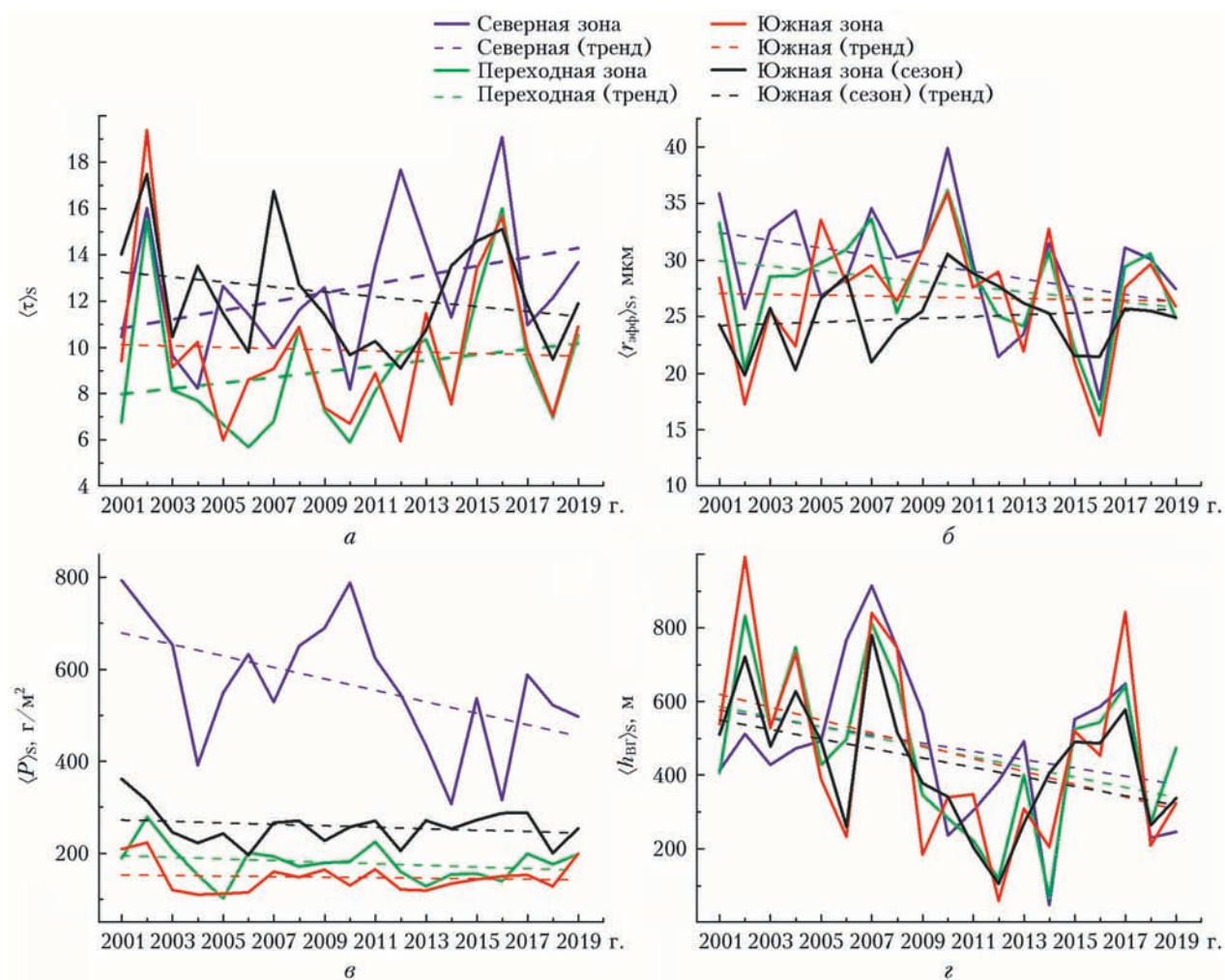


Рис. 2. Временные ряды значений оптической толщины (*a*), эффективного радиуса частиц (*б*) для *Ns*, а также водозапаса (*в*) и высоты верхней границы (*г*) для *St* над различными широтными зонами Западной Сибири в феврале, а для южной зоны еще и за весь зимний сезон