

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.576.32

**Характеристики различных типов облачности
над природными зонами Западной Сибири
по спутниковым данным MODIS**

**В.Г. Астафуров¹, А.В. Скороходов¹, К.В. Курьянович¹,
Я.К. Митрофаненко^{1,2*}**

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

² *Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 8.11.2019 г.

Приведена методика исследования сезонных вариаций параметров облаков над регионами Западной Сибири по спутниковым данным. Выделено пять природных зон: тундра, лесотундра, болота, тайга и лесостепь. Введена объединенная «летняя» и «зимняя» классификация облачности, включающая в себя 16 и 12 разновидностей облаков соответственно. Для классификации изображений облачности используется алгоритм на основе нейросетевых технологий и методов нечеткой логики. Обсуждаются результаты анализа сезонных вариаций некоторых параметров различных типов облачности и их повторяемость над рассматриваемыми регионами Западной Сибири по спутниковым данным MODIS за 2017 г. Найденные зависимости сезонной изменчивости характеристик облачности хорошо согласуются с известными литературными данными по наземным наблюдениям, что подтверждает эффективность предложенной методики.

Ключевые слова: Западная Сибирь, климат, облачность, природные зоны, сезонные вариации, спутниковые данные MODIS, характеристики облаков; Western Siberia, climate, cloud cover, natural areas, seasonal variations, satellite data, cloud parameters.

Введение

Глобальное поле облачности ежедневно покрывает в среднем ~70% поверхности Земли [1]. Межправительственная группа экспертов (IPCC) в своих ежегодных докладах относит облака к одному из основных источников неопределенности в будущих изменениях климата [2]. Так, усиление парникового эффекта, наблюдаемое уже несколько десятилетий, может привести к уменьшению относительной влажности, а впоследствии и к сокращению общей облачности, но при этом регистрируемое потепление способствует увеличению испаряемости и, следовательно, количества облаков [3]. На сегодняшний день активно развиваются математические модели климата и численного прогноза погоды. Однако ни в одной из них в достаточной степени не отражена взаимосвязь климатических изменений и характеристик глобального поля облачности [4]. Причина этого — недостаточное пространственное и временное разрешения существующих моделей [5]. Поэтому в настоящее время при построении региональных

климатических моделей большое внимание уделяется улучшению параметрического описания подсеточных атмосферных процессов с характерными размерами до 1 км [6]. Их использование позволит оценить вклад различных регионов планеты в климатическую систему Земли.

К числу таких макрорегионов относится Западная Сибирь, интересующая климатологов и метеорологов в качестве своеобразного маркера глобальных изменений климата [7]. Этот регион расположен одновременно в нескольких климатических зонах и характеризуется значительными изменениями приземной температуры воздуха с 1970-х гг. [8].

Для построения региональных климатических моделей необходимы данные о процессах и явлениях над конкретной территорией за продолжительный период времени с более высоким разрешением, чем 1° географической сетки, что примерно равно 25 км [9]. К таким данным относится многолетняя изменчивость повторяемости облаков различных типов и их характеристик над отдельными регионами планеты, поскольку структура глобального поля облачности является неоднородной.

Современная метеорологическая классификация включает 27 разновидностей облаков: 10 основных форм, их подтипы и некоторые сочетания [10]. При этом механизмы образования различных типов об-

* Владимир Глебович Астафуров (astafurov@iao.ru); Алексей Викторович Скороходов (vazime@yandex.ru); Ксения Викторовна Курьянович (ksuyain@mail.ru); Яна Константиновна Митрофаненко (yana-910@yandex.ru).

лачности отличаются. Кучевые облака формируются под воздействием конвекции при слабой неустойчивости атмосферы и наличии турбулентных вихрей, а слоистые – при охлаждении теплого воздуха подстилающей поверхностью, в результате радиационного выхолаживания в ночное время суток или турбулентного перемешивания водяного пара [11]. Отличается также степень воздействия различных типов облачности на климатическую систему. Облака нижнего яруса препятствуют выхолаживанию подстилающей поверхности в зимнее время и отражают значительную часть солнечной радиации [12]. Облачность верхнего яруса экранирует уходящее длинноволновое излучение, усиливая парниковый эффект, и рассеивает приходящее [13]. Облака среднего яруса, часто имеющие смешанную структуру, существенно влияют на радиационный баланс в моменты прохождения атмосферных фронтов над конкретной территорией [14]. Характеристики облаков одного и того же типа непостоянны и зависят от множества факторов. Ключевыми являются регион наблюдения и тип подстилающей поверхности: высота верхней границы облачности верхнего яруса находится на уровне 4–8 км в заполярных широтах, 10–12 км в умеренных и 16–18 км в тропиках [11].

В настоящей работе обсуждаются методика и результаты анализа сезонно-широтных закономерностей распределения различных разновидностей облаков и их характеристик над территорией Западной Сибири по спутниковым данным MODIS за 2017 г.

Исходные данные

На рис. 1 (цв. вкладка) приведена схематическая карта Западной Сибири с выделенными на ней природными зонами: тундра (66–73° с.ш.), лесотундра (64–66° с.ш.), болота (58–64° с.ш.), тайга (56–58° с.ш.) и лесостепь (52–56° с.ш.). Для восстановления и анализа характеристик облачности используется приближенная форма границ природных зон. При этом зона тайги условно разделена на две части: тайга и болота, к последней относится заболоченная территория тайги. Болота не являются классической природной зоной, но занимают значительную часть Западной Сибири и влияют на различные атмосферные процессы и климат в целом в рассматриваемом регионе и за его пределами. Поэтому они представляют несомненный интерес [15] и выделены нами в отдельную зону.

Из-за ограниченных возможностей спутниковой съемки и с учетом того, что облака вертикального развития практически не встречаются в зимнее время года, нами предложена объединенная «летняя» и «зимняя» классификация облачности [16], приведенная в табл. 1. Она сформирована на основе анализа информативности статистических моделей текстуры изображений [17] и физических параметров [18] различных типов облачности, показавших значительное сходство некоторых подтипов слоистых, высококучевых, перистых и перисто-слоистых облаков. Сходные типы объединены в один класс

с названием основной формы или вида облачности. Для описания облачности используются общепринятые в климатологии и метеорологии параметры [11]: повторяемость N , оптическая толщина τ , эффективный радиус частиц $r_{эфф}$, водозапас P , фазовый состав F , коэффициент отражения ρ , высота $h_{ВГ}$, давление $p_{ВГ}$ и температура верхней границы $T_{ВГ}$, эффективная излучательная способность ϵ , температура нижней границы $T_{НГ}$ и испаряемость E .

Таблица 1

Объединенная классификация облачности

Тип облачности	Летняя	Зимняя
<i>Облака вертикального развития</i>		
Кучевые плоские (<i>Cu hum</i>)	+	–
Кучевые средние и мощные (<i>Cu med/cong</i>)	+	–
Кучево-дождевые лысые (<i>Cb calv</i>)	+	–
Кучево-дождевые волосатые (<i>Cb cap</i>)	+	–
<i>Нижний ярус</i>		
Слоисто-кучевые кучевообразные (<i>Sc cuf</i>)	+	+
Слоисто-кучевые волнистообразные (<i>Sc und</i>)	+	+
Слоистые (<i>St</i>)	+	+
Слоисто-дождевые (<i>Ns</i>)	+	+
Сочетание кучевых и слоисто-кучевых (<i>Cu & Sc</i>)	+	+
<i>Средний ярус</i>		
Высокослоистые (<i>As</i>)	+	+
Высококучевые волнистообразные (<i>Ac und</i>)	+	+
Высококучевые кучевообразные (<i>Ac cuf</i>)	+	+
<i>Верхний ярус</i>		
Перистые волокнистые (<i>Ci fib</i>)	+	+
Перистые плотные (<i>Ci sp</i>)	+	+
Перисто-слоистые (<i>Cs</i>)	+	+
Перисто-кучевые (<i>Cc</i>)	+	+

Указанные характеристики для каждого типа облачности по результатам классификации извлекались из тематических продуктов MOD06_12 и MYD06_12. Повторяемость определялась для каждой природной зоны по результатам классификации изображений поля облачности с помощью разработанного и реализованного нами алгоритма на основе нейросетевых технологий и методов нечеткой логики [19]. Классификатор позволяет распознавать 16 и 12 разновидностей облаков в летнее и зимнее время (табл. 1) при отсутствии и наличии снежного покрова с вероятностью 0,85 [19] и 0,79 [16] соответственно. Указанные оценки вероятностей правильной классификации получены на основе обработки тестовых выборок, состоящих из фрагментов изображений различных типов облачности размером 21 × 21 пиксель.

В работе используются спутниковые данные MODIS за 2017 г., полученные в дневное время над территорией Западной Сибири. Траектории спутников Terra и Aqua, на борту которых установлен этот сенсор, обеспечивают ежедневное покрытие всей территории Западной Сибири. Всего выбрано 363 снимка,

Распределение числа снимков по зонам в течение года

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Тундра	0	9	17	17	17	15	14	13	9	9	2	0
Лесотундра	0	17	24	22	21	21	21	22	14	22	7	0
Болота	30	28	30	30	30	30	31	31	20	31	30	18
Тайга и лесостепь	31	28	30	30	30	30	31	31	20	31	30	31

охватывающих различные природные зоны. В табл. 2 приведено распределение числа снимков по зонам для каждого месяца (для каждого дня выбирается не более одного снимка, который может охватывать одновременно несколько природных зон).

Для определения повторяемости различных типов облачности применялись данные с пространственным разрешением 250 м в спектральном интервале 0,62–0,67 мкм. Восстановление характеристик различных разновидностей облаков осуществлялось на основе тематических продуктов спутниковой съемки MOD06_12 (спутник Terra) и MYD06_12 (спутник Aqua) с разрешением 1000 м. Также использовались соответствующие файлы геопривязки MOD03 и MYD03.

Методика анализа изменчивости характеристик облачности

Для оценки изменчивости характеристик различных типов облачности над территорией Западной Сибири на проклассифицированный спутниковый снимок (рис. 2, б, цв. вкладка) накладывается маска исследуемого региона (рис. 2, а). В каждой природной зоне (см. рис. 1) с учетом координат ее условных границ находится повторяемость рассматриваемых типов облачности, приведенных в табл. 1, по формуле

$$N_j = \frac{\sum_{i=1}^M s_{ji}}{M}$$

Здесь N_j – повторяемость j -го типа облачности; M – число используемых изображений в месяце; s_i – число пикселей на i -м изображении, принадлежащих рассматриваемой климатической зоне; s_{ji} – число пикселей, занимаемых j -м типом облачности на i -м изображении и имеющих цвет согласно принятой легенде (рис. 2, б).

Следует отметить, что мы анализируем только пиксели, принадлежащие однослойной облачности, на основании значения соответствующего флага в продуктах MOD06_12 и MYD06_12. Для каждого спутникового снимка и всех природных зон вычисляются средние значения исследуемых характеристик различных типов облаков. В результате обрабатываются все выборочные значения за исследуемый промежуток времени и формируется сводная база данных. Используя полученную информацию, можно построить годовой ход рассматриваемых характеристик любого типа облачности над различными природными зонами, что позволит оценить их сезонную изменчивость. На рис. 3 приведены исход-

ные данные и полученный по ним методом скользящего среднего годовой ход оптической толщины τ слоисто-дождевых облаков над природной зоной «болота».

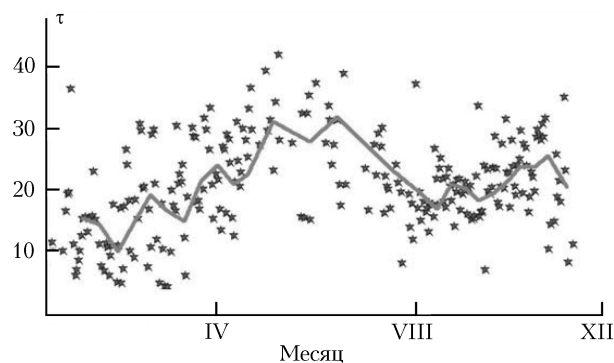


Рис. 3. Годовой ход оптической толщины слоисто-дождевых облаков над болотами

Исходной характеристикой для оценки точности повторяемости N_j являются вероятности правильной классификации \hat{p} . Исходя из этого можно показать, что относительную среднеквадратическую погрешность N_j можно найти по приближенной формуле

$$\delta(N_j) \approx \sqrt{(1 - \hat{p}) / (m_j \hat{p} M)},$$

где m_j – число пикселей j -го типа облачности на изображениях в текущем месяце. При обработке данных для каждой зоны учитывались значения с $m_j \geq 5000$. В этом случае $\delta(N_j) \leq 10^{-3}$.

Погрешность определения физических параметров облачности зависит от качества классификации, точности методики измерений и величины флуктуаций физических характеристик облачности. Ошибки классификации, как показано выше, незначительны. Для определения P , τ и $r_{эфф}$ в продуктах MODIS используется методика, связанная с радиационными расчетами на основе решения уравнения переноса излучения [20]. Значения указанных параметров облаков и точность их определения будут зависеть от характеристик съемки (углов визирования и солнца), а также от выбранного спектрального диапазона и его ширины. Согласно технической документации MODIS известны только погрешности восстановления высоты (300 м), температуры (1,5 К) и давления (30–100 гПа) на верхней границе облаков. В настоящее время данные MODIS по τ , $r_{эфф}$ и P принято считать «эталонными» и рекомендованными к сопоставлению с данными других приборов. В частности, такое сравнение присутствует в [21].

Флуктуации физических характеристик облачности являются значимыми и связаны с существен-

ной пространственно-временной неоднородностью облачных образований. При определении сезонной изменчивости физических характеристик усреднение выполняется в два этапа: пространственное — по результатам классификации каждого снимка — и временное — в течение месяца (30 дней). В табл. 3 приведены относительные среднеквадратические отклонения водозапаса δ_P и оптической толщины δ_τ за июль для природной зоны «тайга». Полученные значения отражают высокий уровень флуктуаций физических характеристик облаков, что видно из рис. 3. Они явно выражены для высокослоистых и слоисто-дождевых типов облачности и в меньшей степени для кучевых плоских.

Таблица 3
Оценки относительных среднеквадратических отклонений водозапаса δ_P и оптической толщины δ_τ за июль для природной зоны «тайга»

Тип облачности	$\delta_P \left(\frac{\delta_P}{\sqrt{30}} \right)$	$\delta_\tau \left(\frac{\delta_\tau}{\sqrt{30}} \right)$
As	0,76 (0,14)	0,75 (0,14)
Ns	0,74 (0,14)	0,71 (0,13)
Cu hum	0,27 (0,05)	0,17 (0,03)

Результаты исследования характеристик облачности

На рис. 4 показан годовой ход N , τ и P для кучевых плоских (*Cu hum*), слоисто-дождевых (*Ns*) и высокослоистых (*As*) облаков над различными природными зонами Западной Сибири. При этом относительные среднеквадратические погрешности найденных оценок P и τ равны $\delta_P/\sqrt{30}$ и $\delta_\tau/\sqrt{30}$ соответственно.

Приведенные результаты показывают их существенную изменчивость в течение года и зависимость от природной зоны, что связано с климатическими особенностями, различным гидрологическим режимом и особенностями подстилающей поверхности, определяющими режим формирования облачного покрова в различных регионах. Полученные зависимости повторяемости различных типов облачности (рис. 4, а, з, ж) хорошо согласуются с приведенными в [11, 22] сведениями о ее годовом ходе по данным наблюдений на метеостанциях. Так, повторяемость кучевых облаков $N(Cu)$ (рис. 4, а, з) имеет явно выраженный максимум в летнее время, что определяется более высокими температурой и влажностью

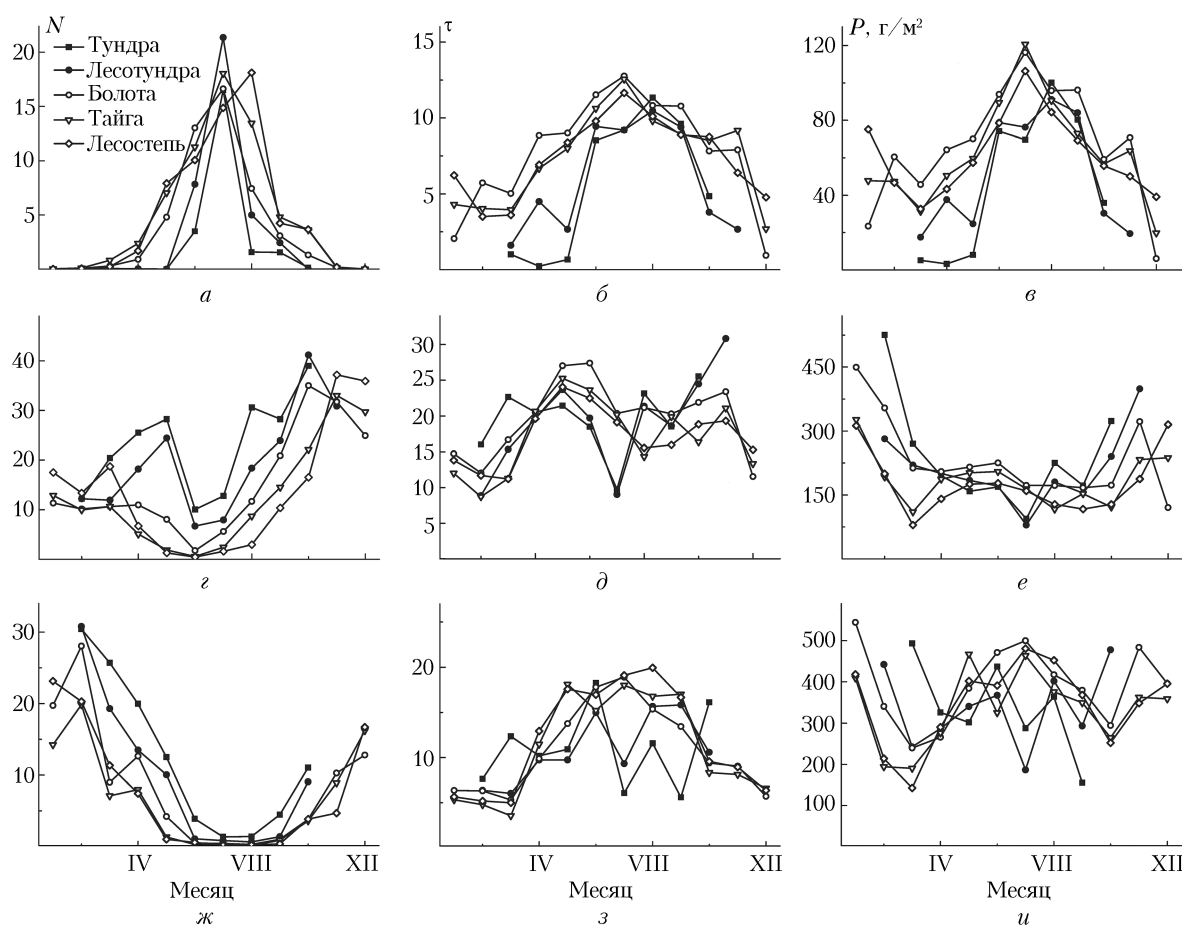


Рис. 4. Годовой ход средних значений N (а, з, ж), τ (б, д, з) и P (в, е, и) для *Cu hum* (а–в), *Ns* (з–е), *As* облаков (ж–и) над различными природными зонами Западной Сибири (на всех рисунках приняты одинаковые обозначения)

Заключение

Предложена методика для исследования сезонной изменчивости характеристик различных типов облачности и их повторяемости по спутниковым данным MODIS над определенной территорией. С ее помощью проведен анализ облачного покрова над различными природными зонами Западной Сибири по данным за 2017 г. Полученные результаты подтверждают эффективность разработанного на основе нейросетевых технологий и методов нечеткой логики алгоритма классификации изображений облачности [19] и их последующей обработки с привлечением тематических продуктов спутниковой съемки MODIS.

Найденные зависимости сезонной изменчивости повторяемости различных типов облачности не противоречат имеющимся литературным данным и дают возможность выявить ее особенности для разных климатических зон. Следует отметить, что высокая эффективность классификации изображения поля облачности позволяет правильно определить по тематическим продуктам физические параметры, соответствующие конкретному типу облачности. В результате полученные сезонные зависимости оптической толщины различных типов облачности (см. рис. 4, б, д, з и рис. 5) хорошо согласуются с имеющимися данными [4, 11]. Необходимо подчеркнуть, что качество полученных результатов определяется эффективностью классификации и точностью продуктов MODIS. Также нужно понимать, что приведенные результаты относятся к полю однослойной облачности, о чем уже говорилось выше.

В дальнейшем необходимо провести сопоставление наших результатов с независимыми данными, которые могут быть получены на основе измерений сетью наземных метеостанций или с помощью других систем дистанционного зондирования. Проблема сравнения с наземными наблюдениями связана с субъективизмом в оценке количества облаков и смещением оценок закрытости земной поверхности облаками из-за искажающего влияния геометрии наземных наблюдений (наблюдения на полусфере). В целом это отдельная задача, которая представляет несомненный интерес, однако ее решение выходит за рамки настоящей работы и требует разработки методических основ.

Применение изложенной в работе методики к многолетним рядам спутниковых данных позволит определить изменчивость характеристик облачности над территорией Западной Сибири на большом интервале времени. Это даст возможность выявить преобладающие в этом регионе атмосферные процессы, понять взаимосвязь различных характеристик облачного поля с происходящими климатическими изменениями и оценить их вклад в глобальную климатическую систему Земли.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН (рег. № НИОКТР АААА-А17-117021310142-5).

1. Quante M. The role of clouds in the climate system // J. Phys. IV France. 2004. V. 121. P. 61–86.

воздуха, способствующими появлению облаков вертикального развития. Подобные зависимости имеют повторяемости $N(Cb\ calv)$ и $N(Cb\ cap)$ для подтипов кучево-дождевых облаков. Годовой ход их суммарной повторяемости по данным наземных наблюдений для г. Томска приведен в [11] и качественно согласуется с нашими результатами. Аналогичные зависимости имеют оптическая толщина (рис. 4, б) и водозапас (рис. 4, в) для Cu , связанные с большей мощностью этих облаков в летний период. Повторяемость слоисто-дождевых облаков $N(Ns)$ (рис. 4, г) фронтального происхождения совпадает с годовым ходом повторяемости циклонов, возрастающей в зимнее и существенно уменьшающейся в летнее время [22]. При этом наименьшей повторяемостью слоисто-дождевых облаков в 2017 г. характеризуется лесостепь, а наибольшей – лесотундра и тундра. Поскольку слоисто-дождевые и высокослоистые облака в основном являются частью одной обширной облачной системы $Ns-As$ [11], то их повторяемость тесно связана между собой, что и иллюстрируют приведенные на рис. 4, г, ж сезонные зависимости $N(Ns)$ и $N(As)$, имеющие явно выраженный минимум в летнее время. Также следует отметить возрастающие значения повторяемости слоисто-дождевых облаков на севере Западной Сибири над тундрой и лесотундрой в летнее время, связанные, очевидно, с климатическими особенностями этого региона.

На рис. 5 показаны сезонные зависимости оптической толщины кучево-дождевых волосатых ($Cb\ cap$), кучевых плоских ($Cu\ hum$), слоисто-дождевых (Ns), высокослоистых (As) и перистых волокнистых ($Ci\ fib$) облаков над лесостепью.

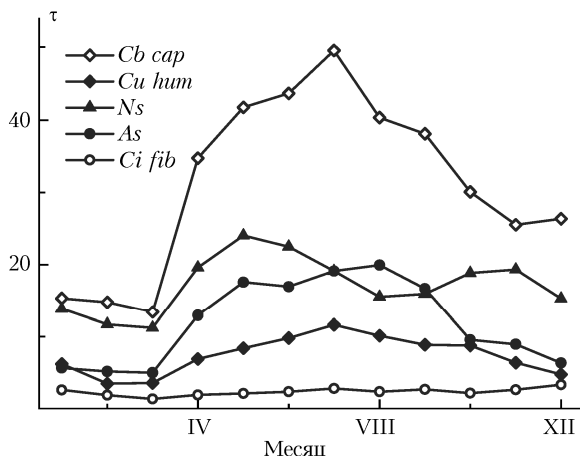


Рис. 5. Годовой ход оптической толщины для различных типов облачности над лесостепью

Соотношения между значениями оптических толщин различных типов облачности хорошо согласуются с данными ISCCP [4]. Следует отметить, что в наименьшей степени годовая изменчивость τ проявляется у перистых облаков, имеющих более стабильный фазовый состав по сравнению с другими формами нижних слоев облачности. Меньшие значения τ остальных типов облачности приходятся на зимнее время, что также согласуется с полученными в рамках проекта ISCCP результатами.

2. Bony S., Stevens B., Frierson D.M.W., Jakob C., Kamegaya M., Pincus R., Shepherd T.G., Sherwood S.C., Siebesma A.P., Sobel A.H., Watanabe M., Webb M.J. Clouds, circulation and climate sensitivity // *Nat. Geosci.* 2015. V. 8. P. 261–268.
3. Чернокульский А.В. Анализ глобального поля облачности и связанных с его вариациями климатических эффектов: дис. канд. физ.-мат. наук. Москва, ИФА РАН, 2010. 179 с.
4. *International Satellite Cloud Climatology Project 1982–2010* [Electronic resource] URL: <http://isccp.giss.nasa.gov> (last access: 1.11.2019).
5. Young A.H., Knapp K.R., Inamdar A., Hankins W., Rossow W.B. The International Satellite Cloud Climatology Project H-Series climate data record product // *Earth Syst. Sci. Data.* 2018. V. 10. P. 583–593.
6. Анисимов А.Е., Яровая Д.А., Барабанов В.С. Реанализ атмосферной циркуляции для Черноморско-Каспийского региона // *Морской гидрофиз. журн.* 2015. № 4. С. 14–28.
7. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я. Региональные особенности долгопериодного изменения облачного покрова в Сибирском секторе Северного полушария за последние 45 лет (1969–2013 гг.) // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 12. С. 1079–1084; Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я. Regional features of long-term changes in cloud cover in Siberian sector of Northern hemisphere for the last 45 years (1969–2013) // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 2. P. 175–179.
8. Лагутин А.А., Волков Н.В., Мордвин Е.Ю., Резников А.Н. Моделирование климата Западной Сибири: результаты модели RegCM4 // *Изв. Алтайского гос. ун-та.* 2012. № 1. Ч. 1. С. 181–189
9. Толстых М.А. Глобальные модели атмосферы: современное состояние и перспективы развития // *Тр. Гидрометцентра России.* 2016. № 1. С. 5–33.
10. Беспалов Д.П., Девяткин А.М., Довгалик 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.
11. Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
12. Zelinka M.D., Klein S.A., Taylor K.E., Andrews T., Webb M.J., Gregory J.M., Forster P.M. Contributions of different cloud types to feedbacks and rapid adjustments in CMIP5 // *J. Clim.* 2013. V. 26. P. 5007–5027.
13. Pandit A.K., Gadhave H.S., Ratnam M.V., Raghunath K., Rao S.V.B., Jayaraman A. Long-term trend analysis and climatology of tropical cirrus clouds using 16 years of lidar data det over Southern India // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 3833–3848.
14. Wang T., Fetzer E.J., Wong S., Kahn B.H., Yue Q. Validation of MODIS cloud mask and multilayer flag using CloudSat-CALIPSO cloud profiles and a cross-reference of their cloud classifications // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121. P. 11620–11635.
15. Букарева Е.Н. Роль наземных экосистем в регуляции климата и место России в посткритическом процессе. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2010. 97 с.
16. Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Musienko O.P., Kuriyanovich R.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. V. 10833. DOI: 10.1117/12.2504068.
17. Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Статистическая модель текстуры изображений облачного покрова по спутниковым данным // *Метеорол. и гидрол.* 2017. № 4. С. 53–66.
18. Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Статистическая модель физических параметров облачности на основе тематических продуктов MODIS // *Исслед. Земли из космоса.* 2017. № 5. С. 66–81.
19. Скороходов А.В., Астафуров В.Г., Евсюткин Т.В. Применение статистических моделей текстуры изображений и физических параметров облаков для их классификации на спутниковых снимках MODIS // *Исслед. Земли из космоса.* 2018. № 4. С. 43–58.
20. King M.D., Tsay S.-C. Cloud retrieval algorithms for MODIS: Optical thickness, Effective Particle Radius, and Thermodynamic Phase // *MODIS Algorithm Theoretical Basis Document.* URL: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod05.pdf (last access: 15.01.2020).
21. Meyer K., Yang Y., Platnick S. Uncertainties in cloud phase and optical thickness retrievals from the Earth Polychromatic Imaging Camera (EPIC) // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9. P. 1785–1797.
22. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР.* В 10 т. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Б.Х. Глуховской (ред.). Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.

V.G. Astafurov, A.V. Skorokhodov, K.V. Kur'yanovich, Y.K. Mitrofanenko. Parameters of various cloud types over the natural zones of Western Siberia according to MODIS satellite data.

A methodology for studying seasonal variations in cloud parameters over the regions of Western Siberia using satellite data is presented. Five natural zones have been identified: tundra, forest-tundra, bogs, taiga, and forest-steppe. A combined “summer” and “winter” cloud classification has been introduced including 16 and 12 cloud types, respectively. An algorithm based on neural network technologies and fuzzy logic methods is used for cloud image classification. The results of analysis of seasonal variations in some parameters of various cloud types and their repeatability over the considered regions of Western Siberia based on MODIS satellite data for 2017 are discussed. The dependences found for seasonal variability of cloud parameters are in a good agreement with the known literature data that confirms high efficiency of the technique proposed.

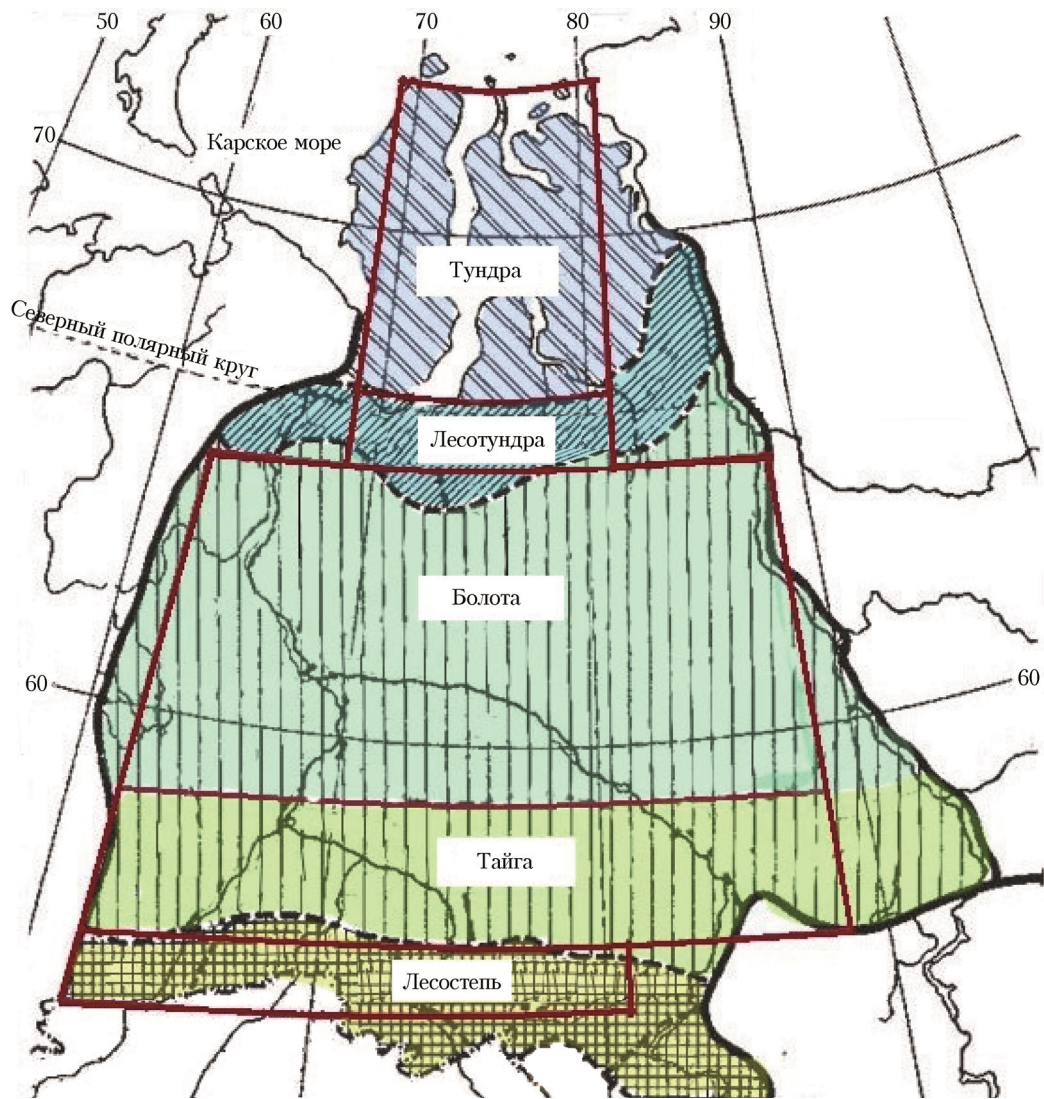


Рис. 1. Природные зоны Западной Сибири

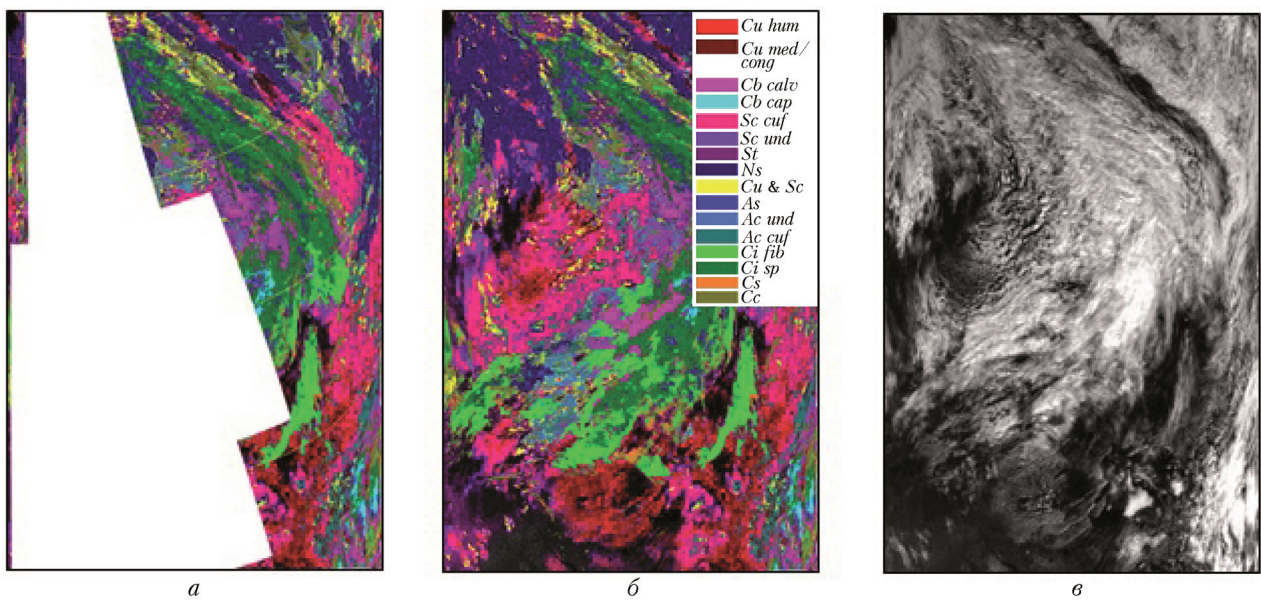


Рис. 2. Результат наложения маски региона (а) на проклассифицированное изображение облачности (б) по спутниковому снимку (в)