

УДК 551.582.2

# Статистическая модель текстуры изображений и физических параметров облачности в периоды залегания снежного покрова на территории Российской Федерации по данным MODIS

В.Г. Астафуров<sup>1,2</sup>, А.В. Скороходов<sup>1</sup>, О.П. Мусиенко<sup>1,2</sup>, К.В. Курьянович<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40*

<sup>2</sup> *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 2.02.2018 г.

Представлены статистические модели текстуры изображений и физических параметров облачности над различными природными зонами Российской Федерации в периоды залегания снежного покрова. Построение моделей основано на определении законов распределения и оценок их параметров, которыми описываются различные характеристики облаков, восстановленные по спутниковым данным MODIS различного пространственного разрешения. Приведены наиболее повторяющиеся типы облачности в периоды залегания снежного покрова. Обсуждаются результаты сравнительного анализа статистических моделей облаков в различных природных зонах, а также объединенных по ним моделей облачности над заснеженной территорией и подстилающей поверхностью, свободной от снега. Отмечена изменчивость характерных значений текстурных признаков и физических параметров облаков, наблюдаемых над различными регионами Российской Федерации.

*Ключевые слова:* климат, облачность, снежный покров, спутниковые данные, статистическая модель, текстурные признаки, физические параметры; climate, cloudiness, snow cover, satellite data, statistical model, texture features, physical parameters.

## Введение

Идентификация облачности и классификация ее типов над заснеженной подстилающей поверхностью, по данным дистанционного зондирования Земли из космоса, являются одной из актуальных задач в этой области. В первую очередь это связано со схожей отражательной способностью снега и облаков [1]. Второй причиной является то, что текстура изображений оптически тонких разновидностей облачности, расположенных над снежным покровом, на спутниковых снимках видимого диапазона спектра едва различима [2]. На данный момент основным подходом к разделению облачных и снежных участков на изображениях из космоса является использование нормализованного дифференциального индекса снега NDSI [3]. Однако его характерные значения у различных типов облачности слабо различаются между собой, что не позво-

ляет применять данный параметр для решения задачи ее классификации над снежным покровом, которая практически не освещена в работах отечественных и зарубежных авторов. При этом результаты наземных и спутниковых измерений свидетельствуют о том, что характеристики облаков одного и того же типа могут существенно различаться в теплое и холодное время года, а также варьироваться в различных климатических поясах и природных зонах [4, 5].

Цели данной работы – исследование изменчивости текстурных признаков и физических параметров облачности над территорией Российской Федерации в периоды залегания снежного покрова и построение их статистических моделей в продолжении работ [6, 7].

## Исходные данные

В исследовании использовались спутниковые данные MODIS, полученные в период с 2010 по 2017 г. над территорией Российской Федерации. Рассмотрены природные зоны, характеризующиеся не только большей продолжительностью залегания

\* Владимир Глебович Астафуров (astafurov@iao.ru);  
Алексей Викторович Скороходов (vazime@yandex.ru);  
Ольга Павловна Мусиенко (prosto-olya13.07@yandex.ru);  
Ксения Викторовна Курьянович (ksuyain@mail.ru).

снежного покрова в течение года (арктические пустыни, тайга и тундра), но и особенностями текстуры подстилающей поверхности на спутниковых снимках видимого диапазона спектра (болота и степи). Переходные зоны (лесостепи и лесотундры) в данной работе не исследовались из-за отсутствия существенных отличий их текстур от основных зон. Следует отметить, что болота не относятся к природным зонам, но на территории Российской Федерации занимают значительные площади, вносят существенный вклад в различные атмосферные процессы и поэтому представляют несомненный интерес. Повторяемость различных разновидностей облаков была определена на основе данных 27 наземных метеостанций различных природных зон, охватывающих европейскую и азиатскую части Российской Федерации: Анадырь (64,8° с.ш., 177,6° в.д.), Ноябрьск (63,2° с.ш., 75,4° в.д.), Вилуйск (63,8° с.ш., 121,6° в.д.), Цимлянск (47,6° с.ш., 42,1° в.д.) и др.

В результате анализа полученной информации из рассмотрения были исключены арктические пустыни по причине недостаточного количества спутниковых данных в светлое время суток из-за полярной ночи. Оценки повторяемости различных типов облачности свидетельствуют о наиболее частом наблюдении ее слоистообразных форм над заснеженной подстилающей поверхностью: слоистых, слоисто-дождевых, высокосоистых и перисто-слоистых облаков. Из рассмотрения была исключена кучевая и кучево-дождевая облачность, которая встречается в основном в периоды таяния снега или как феномен, например, над Байкалом [8]. Таким образом, предложенная нами в [9] классификация облаков была сокращена до 12 разновидностей, характеристики которых и исследовались в данной работе.

Описание облачности осуществляется на основе методов статистического подхода к параметризации текстуры изображений Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM), Gray-Level Difference Vector (GLDV), Sum And Difference Histogram (SADH) и One-Dimensional Signal Histogram (ODSH), а также на основе использования физических параметров облаков, извлекаемых из тематических продуктов спутниковой съемки MOD06\_12 и MYD06\_12 [6, 7]. Информативность рассматриваемых признаков облачности является общепризнанной и подтверждается результатами ее классификации по различным данным дистанционного зондирования Земли из космоса, приведенным в [9–12].

## Статистические модели характеристик облачного покрова

Методика построения статистической модели заключается в определении законов распределения и оценок их параметров, которыми описываются флуктуации значений текстурных признаков и физических параметров различных типов облачности. Основные этапы применяемого подхода [6, 7]:

1. Формирование наборов образцов по природным зонам, состоящих из 200 фрагментов спутниковых снимков MODIS размером  $20 \times 20$  пикселей для каждой из рассматриваемых 12 разновидностей облаков и значений их физических параметров, содержащихся в тематических продуктах MOD06\_12 и MYD06\_12. При этом используется методика сопоставления архивных данных сети наземных метеостанций с результатами спутниковой съемки.

2. Расчет значений 132 текстурных признаков характерных изображений облачности, к числу которых относятся контраст, энтропия, дисперсия, корреляция и другие, с учетом различных угловых направлений [6]. Количество физических параметров облаков (оптическая толщина, эффективный радиус частиц, водозапас и др.) равняется 12 [7].

3. Построение гистограмм значений для каждой характеристики облачности, определение на их основе эмпирических функций распределения  $F(x)$ .

4. Подбор теоретических функций распределения  $T(x)$  и нахождение оценок их параметров путем применения критерия согласия Колмогорова–Смирнова, исходя из минимума статистики

$$D_n = \max_x |F(x) - T(x)|.$$

Данный критерий является одним из самых эффективных в этой области с учетом объема выборочных данных [13]. При этом осуществляется перебор известных двухпараметрических распределений: Вейбулла (I), Гамма (II), Коши (III), лог-логистическое (IV), логнормальное (V), нормальное (VI), Рэлея (VII), Гумбеля (минимальное) (VIII) и Гумбеля (максимальное) (IX), и, варьируя их параметры, производится расчет  $D_n$  для каждого из них. Использование более сложных законов не приводит к существенному уменьшению статистики критерия согласия [6, 7]. Применение же ортогональных полиномов оправдано в случае аппроксимации многомодальных функций распределения, которые несвойственны рассматриваемым в работе характеристикам облачности. Их использование ограничивает область практического применения построенной статистической модели, например при решении задачи классификации облаков.

5. На основе выборочных данных оцениваются среднее  $m_x$  и среднеквадратическое отклонения  $\sigma_x$  для всех рассматриваемых признаков облачности, что позволяет выявить их характерные значения в различных природных зонах.

Результатом выполнения указанных этапов являются статистические модели текстуры изображений и физических параметров 12 разновидностей облачности различных природных зон Российской Федерации в периоды залегания снежного покрова.

## Результаты анализа статистических моделей и их обсуждение

В работе проведен сравнительный анализ построенных статистических моделей, основная цель которого – оценка сходства подобранных законов

распределения и их параметров для одних и тех же характеристик облачности в зависимости от природной зоны. В табл. 1 представлены фрагменты статистических моделей текстурных признаков и физических параметров высококучевых волнистообразных облаков (*Ac und.*) над тайгой и тундрой. Видно, что характеристики рассматриваемого типа облачности имеют одинаковые законы распределения. При этом наблюдаются как сходство (оптическая толщина, контраст GLCM, стандартное отклонение SADH), так и существенные отличия (эффективный радиус частиц, температура верхней границы, дисперсия GLCM) значений параметров, а также оценок  $m_x$  и  $\sigma_x$ . С одной стороны, это свидетельствует об отсутствии влияния типа подстилающей поверхности на характеристики облаков, с другой — подтверждает их зависимость от климатических особенностей природных зон. Особенно отчетливо это заметно на примере температуры верхней границы облачности, которая имеет более низкие характерные значения в тундре, чем в тайге. Подобные противоречия могут быть нивелированы «усреднением» статистических моделей по аналогии с тем, что сделано в [6, 7]. Однако вопрос эффективности использования региональных или обобщенных моделей при решении различных прикладных задач климатологии и метеорологии требует проведения дополнительных исследований.

На рис. 1 показаны значения  $m_x$  и  $\sigma_x$  некоторых характеристик облаков *Ac und.*, наблюдаемых над различными природными зонами. Анализируя указанные параметры облачности, можно выделить ключевые признаки различных ее типов для каждого рассматриваемого в работе региона. Например, из рис. 1 видно, что наибольшим средним значением оптической толщины характеризуются облака *Ac und.* над степями, а наименьшим средним значением контраста GLDV — над болотами. Однако в статистической модели встречаются ситуации, когда зна-

чения  $m_x$  и  $\sigma_x$  одного и того же параметра облачности сходны для двух природных зон, что показано на рис. 1, з. В данном случае необходимо говорить уже о ключевом сочетании характеристик и использовать алгоритмы формирования систем информативных признаков.

Кроме этого, в работе проведен сравнительный анализ двух статистических моделей характеристик облачности, объединенных по всем природным зонам, в период залегания снежного покрова и при его отсутствии соответственно. В табл. 2 приведены фрагменты статистических моделей текстурных признаков и физических параметров высококучевых волнистообразных и перисто-слоистых (*Cs*) облаков в рассматриваемых условиях окружающей среды. Объединенные модели сформированы путем слияния выборок значений характеристик облачности по всем природным зонам. При построении указанных моделей подбирались одноименные распределения с учетом значения статистики  $D_n$ , что видно из табл. 2. Это позволяет упростить не только сравнительный анализ рассматриваемых моделей, но и их использование для решения различных тематических задач.

По аналогии с региональными моделями в табл. 2 также фиксируются сходства и различия параметров подобранных распределений для различных условий окружающей среды. Как и предполагалось, наличие снежного покрова сильнее всего оказывает влияние на значения некоторых текстурных признаков облачности (контрастов GLCM, GLDV, суммарной дисперсии GLCM). Изменчивость физических параметров рассматриваемых типов облаков выражена менее явно. Кроме того, угол Солнца вносит существенный вклад в значения текстурных признаков ODSH. При этом характеристики облачности *Ac und.* варьируются сильнее, чем у облаков *Cs*, в зависимости от наличия или отсутствия снежного покрова.

Таблица 1

Статистические модели характеристик высококучевых волнистообразных облаков для двух природных зон в периоды залегания снежного покрова

Характеристика облачности	Закон распределения ( $\alpha$ или $\sigma$ ; $\beta$ или $\mu$ ) [ $m_x$ ; $\sigma_x$ ]	
	Тайга	Тундра
Оптическая толщина	I (1,38; 17,4) [15,8; 10,6]	I (1,32; 13,9) [12,6; 8,73]
Эффективный радиус частиц	IV (5,20; 9,36) [10,2; 5,27]	IV (3,37; 13,9) [16,8; 10,9]
Водозапас	VI (51,7; 89,5) [89,5; 51,6]	VI (58,7; 104,0) [104,0; 58,7]
Температура верхней границы	II (1996; 0,13) [257; 5,75]	II (812; 0,311) [253; 8,86]
Контраст GLCM	IV (2,94; 2,04) [2,45; 1,54]	IV (2,84; 1,96) [2,41; 1,69]
Дисперсия GLCM	II (1,72; 53,2) [91,2; 69,5]	II (2,21; 42,0) [92,2; 61,8]
Суммарная дисперсия GLCM	V (1,71; 0,96) [8,76 9,13]	V (1,69; 0,80) [8,18; 8,78]
Дифференциальная дисперсия GLCM	V (-0,27; 0,75) [1,03; 0,85]	V (-0,31; 0,77) [1,02; 0,96]
Стандартное отклонение GLDV	VIII (0,15; 0,57) [0,65; 0,19]	VIII (0,16; 0,55) [0,64; 0,20]
Контраст GLDV	IV (2,95; 1,91) [2,29; 1,44]	IV (2,82; 1,81) [2,24; 1,59]
Стандартное отклонение SADH	II (4,37; 0,46) [2,00; 0,96]	II (4,56; 0,43) [1,95; 0,91]
Контраст SADH	V (-0,20; 0,73) [0,98; 0,80]	V (-0,35; 0,76) [0,97; 0,90]
Вариация ODSH	V (6,48; 0,92) [980; 977]	V (6,45; 0,86) [928; 962]

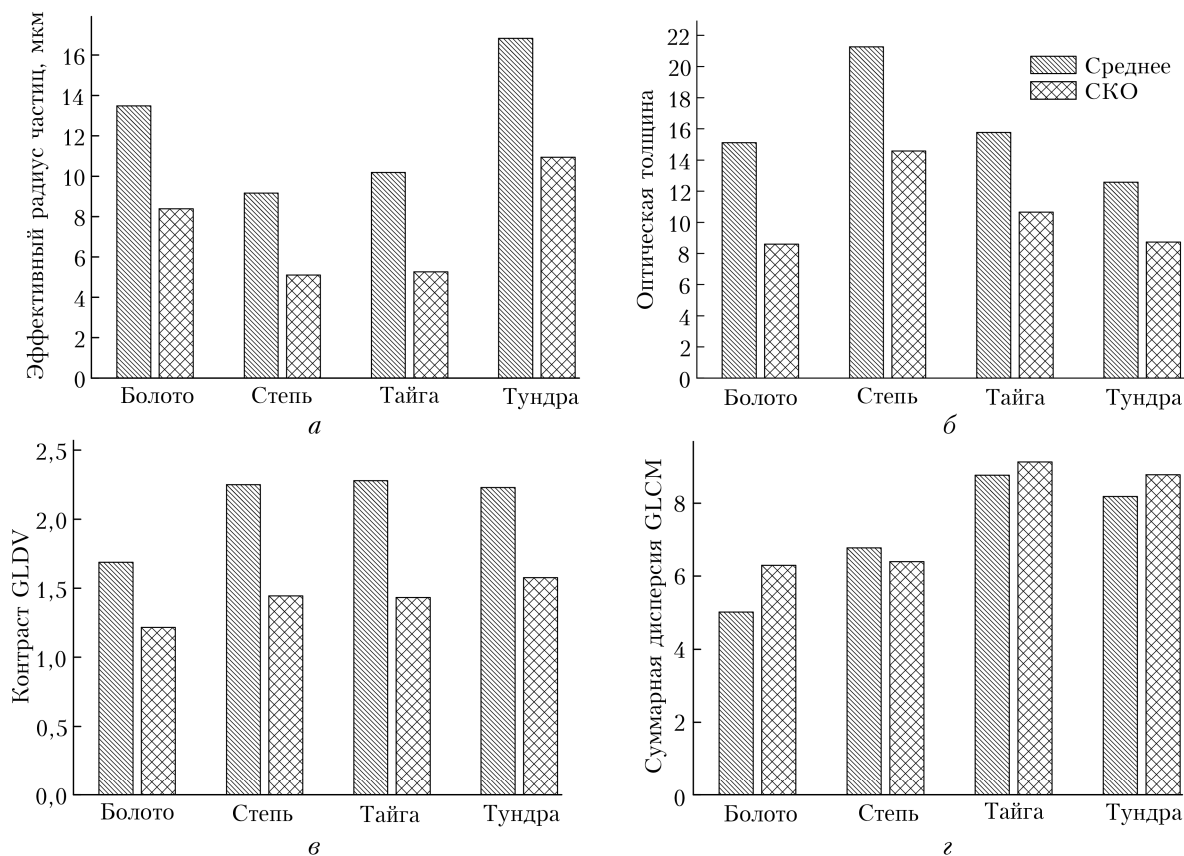


Рис. 1. Средние значения и среднеквадратические отклонения физических параметров (а, б) и текстурных признаков (в, г) для *Ac und.* над различными природными зонами в периоды залегания снежного покрова

Таблица 2

Статистические модели характеристик облачности двух типов при наличии и отсутствии снежного покрова

Характеристики облачности	Закон распределения ( $\alpha$ или $\sigma$ ; $\beta$ или $\mu$ ) [ $m_x$ ; $\sigma_x$ ]	
	Снежный покров	Снежный покров отсутствует
	<i>Ac und.</i>	
Оптическая толщина	IV (2,24; 13,5) [16,2; 11,4]	IV (2,03; 9,58) [12,6; 16,9]
Эффективный радиус частиц	IV (3,98; 10,3) [12,4; 8,37]	IV (4,82; 9,87) [9,64; 5,3]
Водозапас	IV (2,65; 91,1) [102; 58,3]	IV (2,07; 61,5) [76,7; 97,3]
Температура верхней границы	VI (7,27; 256,3) [256,3; 7,27]	VI (9,82; 262,6) [265,4; 9,47]
Контраст GLCM	V (0,64; 0,59) [2,27; 1,55]	V (4,24; 0,83) [5,00; 3,17]
Дисперсия GLCM	I (1,36; 101,0) [95,3; 72,4]	I (1,89; 5,08) [94,9; 67,7]
Суммарная дисперсия GLCM	V (-0,38; 0,734) [7,18; 7,89]	V (2,46; 0,94) [19,1; 16,8]
Дифференциальная дисперсия GLCM	V (1,56; 0,88) [0,93; 0,88]	V (0,52; 0,84) [2,60; 2,16]
Стандартное отклонение GLDV	VIII (0,15; 0,54) [0,63; 0,19]	VIII (0,26; 0,76) [0,95; 0,34]
Контраст GLDV	V (0,57; 0,59) [2,12; 1,45]	V (1,25; 0,65) [4,63; 2,97]
Стандартное отклонение SADH	V (0,51; 0,42) [1,83; 0,85]	V (0,96; 0,45) [3,04; 1,28]
Контраст SADH	V (-0,40; 0,72) [0,89; 0,82]	V (0,46; 0,83) [2,43; 2,03]
Вариация ODSH	V (6,33; 0,84) [820,1; 863,1]	V (7,22; 0,90) [2190; 1850]
	<i>Cs</i>	
Оптическая толщина	I (1,04; 7,25) [2,49; 1,15]	I (2,13; 2,27) [1,47; 1,23]
Эффективный радиус частиц	IX (11,4; 31,0) [35,1; 10,3]	IX (15,2; 36,8) [28,0; 19,5]
Водозапас	I (1,55; 79,9) [53,1; 26,6]	I (1,92; 52,9) [34,3; 30,3]
Температура верхней границы	VI (18,8; 239,7) [224,3; 8,08]	VI (9,82; 229,3) [229,5 9,81213]
Контраст GLCM	VIII (0,17; 0,25) [0,35; 0,21]	VIII (0,21; 0,23) [0,35; 0,28]
Дисперсия GLCM	I (1,63; 106,7) [94,5; 55,4]	I (1,10; 47,3) [29,4; 27,4]
Суммарная дисперсия GLCM	V (-0,046; 0,88) [1,31; 1,25]	V (-0,39; 1,01) [0,92; 1,28]
Дифференциальная дисперсия GLCM	II (2,62; 0,045) [0,11; 0,088]	II (2,13; 0,058) [0,12; 0,12]
Стандартное отклонение GLDV	IV (6,72; 0,28) [0,27; 0,080]	IV (5,40; 0,28) [0,28 0,11]
Контраст GLDV	II (3,24; 0,087) [0,28; 0,16]	II (1,91; 0,16) [0,31; 0,23]
Стандартное отклонение SADH	IV (3,97; 0,73) [0,77; 0,35]	IV (3,68; 0,64) [0,63; 0,35]
Контраст SADH	II (3,52; 0,027) [0,092; 0,055]	II (2,47; 0,043) [0,10; 0,087]
Вариация ODSH	IV (2,11; 111,8) [146; 136]	IV (1,96; 85,7) [107; 142]



## Заключение

Основным результатом работы являются статистические модели текстурных признаков и физических параметров облачности в периоды залегания снежного покрова на территории трех природных зон Российской Федерации (степи, тайги, тундры) и ее заболоченных регионов, построенные на основе спутниковых данных MODIS. Сравнительный анализ полученных моделей, с одной стороны, подтверждает зависимость характеристик облаков от климатических особенностей рассматриваемых регионов планеты, с другой — свидетельствует об отсутствии влияния типа подстилающей поверхности на их изменчивость. Оценка значений  $m_x$  и  $\sigma_x$  позволила выявить ключевые признаки и их сочетания для некоторых типов облачности в различных природных зонах, что может быть использовано при решении различных тематических задач регионального масштаба [14, 15].

В рамках настоящей работы построена объединенная по всем рассмотренным в работе природным зонам статистическая модель характеристик облаков. Вопрос эффективности ее использования необходимо рассматривать отдельно в рамках конкретной решаемой прикладной задачи. Сравнительный анализ объединенных статистических моделей облачности в периоды залегания снежного покрова и при его отсутствии подтвердил влияние заснеженных участков на значение большинства текстурных признаков некоторых разновидностей облаков. При этом изменчивость физических характеристик облачности в рамках этих двух моделей выражена менее явно, что может быть использовано при анализе структуры глобального облачного поля. Перспективное направление развития данной работы — адаптация разработанного в [16] алгоритма классификации облачности для обработки спутниковых сцен, полученных в периоды залегания снежного покрова.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-60019 мол\_а\_дк.

1. Choi H., Bindschadler R. Cloud detection in Landsat imagery of ice sheets using shadow matching technique and automatic normalized difference snow index threshold value decision // *Remote Sens. Environ.* 2004. V. 92. P. 237–242.
2. Chen G., Dongchen E. Support vector machines for cloud detection over ice-snow areas // *Geo Spat. Inf. Sci.* 2007. V. 10. P. 117–120.

3. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V. Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data // *Remote Sens. Environ.* 1995. V. 54. P. 127–140.
4. 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.
5. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Исследование параметров облачности и явлений по данным спутникового и радиолокационного зондирования // *Географ. вестн. Метеорология.* 2011. № 3. С. 59–68.
6. 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.
7. 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.
8. *Облака и облачная атмосфера: справочник* / под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
9. Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Методы автоматической классификации облачности по спутниковым снимкам MODIS // *Исслед. Земли из космоса.* 2016. № 4. С. 35–45.
10. Bankert R.L., Mitrescu C., Miller S.W., Wade R.H. Comparison of GOES cloud classification algorithms employing explicit and implicit physics // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2009. V. 48. P. 1411–1421.
11. Liu Y., Xia J., Shi C.-X., Hong Y. An improved cloud classification algorithm for China's FY-2C multi-channel images using artificial neural network // *Sensors.* 2009. V. 9. P. 5558–5579.
12. Jin W., Gong F., Zeng X., Fu R. Classification of clouds in satellite imagery using adaptive fuzzy sparse representation // *Sensors.* 2016. V. 16. P. 2153. DOI:10.3390/s16122153.
13. Лемешко Б.Ю. Непараметрические критерии согласия. Руководство по применению. М.: ИНФРА-М, 2014. 163 с.
14. Сафонова Т.В. *Авиационная метеорология.* Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. 215 с.
15. Позднякова В.А. *Практическая авиационная метеорология: учеб. пособие.* Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. 113 с.
16. Астафуров В.Г., Евсюткин Т.В., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Классификация текстур основных типов облачности по данным MODIS с помощью нечетких систем // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. Т. 14, № 5. С. 9–18.

**V.G. Astafurov, A.V. Skorokhodov, O.P. Musienko, K.V. Kur'yanovich. Statistical models of image texture and physical parameters of cloudiness during snow cover periods on the Russian Federation territory from MODIS data.**

Parametric statistical models of the image textures and physical parameters of cloudiness over various natural regions of the Russian Federation during snow cover are presented. The cloud texture description is based on the GLCM, GLDV, SADH, and OSDH methods of statistical approach to describing the texture of their images in the visible spectral range (0.62–0.67  $\mu\text{m}$ ). The probability densities and estimates of their parameters are found. They describe the fluctuations in the physical parameters of the clouds and the texture features of their images, determined from MODIS satellite data. The most repetitive cloud types during periods of snow cover are given. The comparative analysis results of statistical cloud models for various natural regions and cloud models over snow-covered territory and a snow-free surface are discussed. The variability of characteristic values of texture features and physical parameters of clouds observed over different natural regions of the Russian Federation is noted.