



ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ
ИМЕНИ В.Е. ЗУЕВА СО РАН



КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЛАЧНОСТИ ПРИ НАЛИЧИИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАНЫМ MODIS

Астафуров В.Г., Скороходов А.В., Курьянович К.В.,
Мусяенко О.П.

Содержание работы

1. Описание существующих проблем в области классификации облачности.
2. Характерные изображения облаков различных типов над снежным покровом.
3. Текстурные признаки и физические параметры облачности.
4. Статистические модели характеристик облачности в периоды залегания снежного покрова.
5. Модифицированный алгоритм классификации облачности.
6. Обсуждение результатов распознавания облаков.
7. Основные выводы и перспективы развития.

Негативные факторы классификации облачности по спутниковым данным

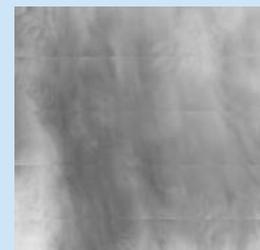
1) Физические характеристики облаков варьируются в зависимости не только от климатического пояса, но и времени года¹. Например, перистая облачность имеет высоту верхней границы:

- до 4 – 8 км в заполярных широтах,
- до 10 – 12 км в умеренных широтах,
- до 16 – 18 км в тропиках.

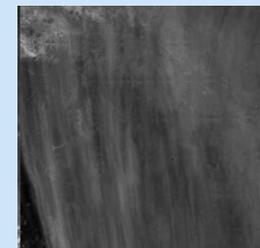
2) Наличие снежного покрова препятствует надежному восстановлению текстурных признаков облаков по спутниковым снимкам из-за их близкой отражательной способности²

| Тип поверхности | Альbedo |
|-----------------|-------------|
| Трава | 0,14...0,37 |
| Земля сухая | 0,08...0,14 |
| Земля сырая | 0,08...0,09 |
| Песок | 0,24...0,28 |
| Снег (новый) | 0,8...0,9 |
| Снег (старый) | 0,45...0,7 |
| Лед | 0,37 |
| Гранит | 0,24 |
| Лес | 0,03...0,01 |
| Морская вода | 0,04...0,45 |

| Тип облачности | Альbedo |
|-------------------------------|-------------|
| Очень большие плотные | 0,78 |
| Сплошные слоисто-кучевые | 0,56...0,81 |
| Плотные совсем непрозрачные | 0,44 |
| Высокослоистые с разрывами | 0,17...0,36 |
| Высокослоистые сплошные | 0,39...0,59 |
| Перисто-слоистые сплошные | 0,44...0,56 |
| Слоистые толщиной более 300 м | 0,60...0,85 |
| Слоистые толщиной 150 – 300 м | 0,40...0,70 |
| Слоистые толщиной менее 150 м | 0,10...0,50 |



Перисто-слоистые облака над снегом



Перисто-слоистые облака над «чистой» поверхностью

¹Чернукульский А.В. Анализ глобального поля облачности и связанных с его вариациями климатических эффектов // Диссертационная работа к.ф.-м.н., Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, 2010.

²Будыко М.И. Климатология. Л.: Гидрометеиздат, 1989, 568 с.

Предлагаемый подход

Использование региональных статистических моделей текстурных признаков и физических параметров различных типов облачности позволит:

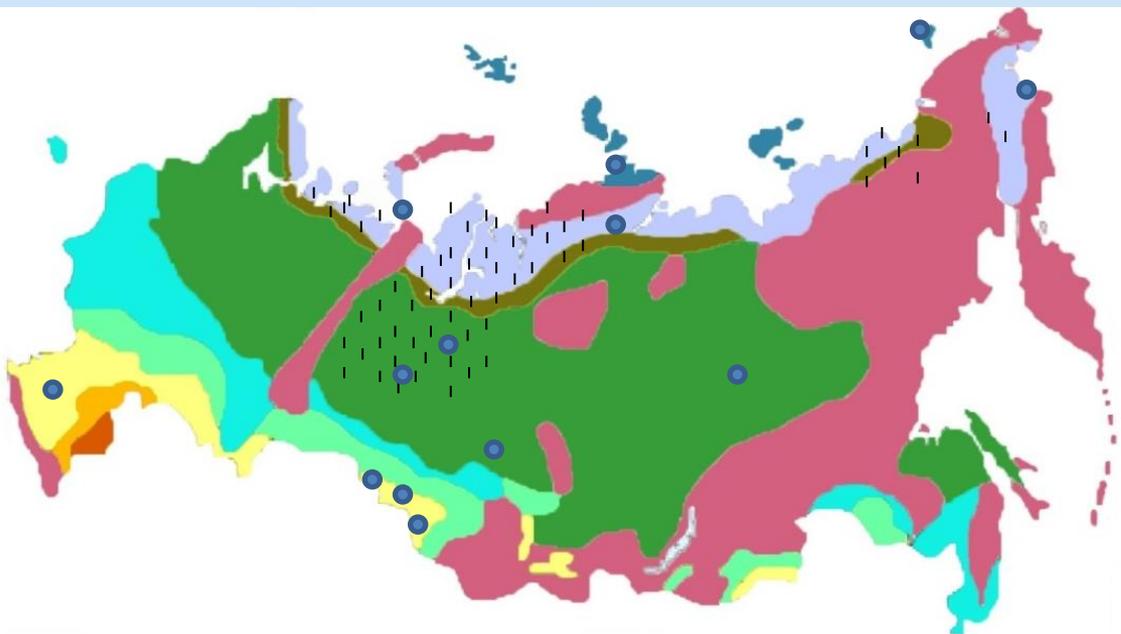
- выделить особенности «летней» и «зимней» классификацию облаков,
- учесть региональные особенности характеристик облачности,
- учесть тип подстилающей поверхности.

Статистическая модель представляет собой наборы распределений и оценок их параметров, которая описывает флуктуации характеристик различных типов облачности. Такие модели удобно использовать при решении задачи классификации облаков по спутниковым снимкам на основе технологии нейронных сетей и методов нечеткой логики¹.

¹Скороходов А.В., Астафуров В.Г., Евсюткин Т.В. Применение статистических моделей текстуры изображений и физических параметров облаков для их классификации на спутниковых снимках MODIS // Исследование Земли из космоса. №3. 2018. (В печати)



Характерные изображения облачности над различными регионами в периоды залегания снежного покрова



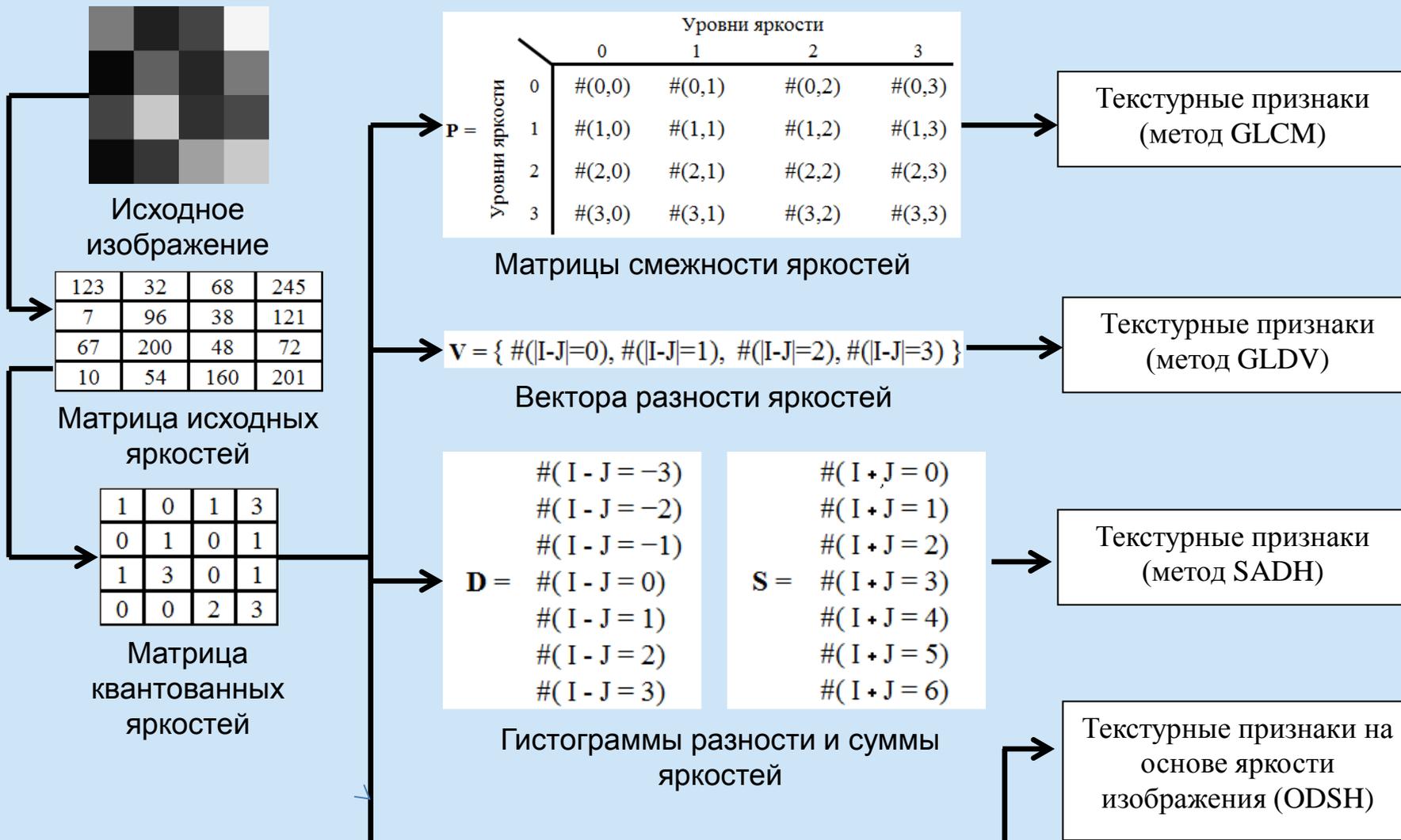
| Название метеостанции | Число снимков | Число фрагментов |
|-----------------------|---------------|------------------|
| Тундра | | |
| Мыс Челюскин | 28 | 31 |
| Анадырь | 50 | 362 |
| Остров Врангеля | 7 | 49 |
| Хатанга | 17 | 72 |
| Мыс Болванский | 3 | 38 |
| Болота | | |
| Сытомино | 30 | 173 |
| Ноябрьск | 20 | 182 |
| Тайга | | |
| Боготол | 65 | 707 |
| Виллюйск | 22 | 208 |
| Степь | | |
| Змеиногоorsk | 23 | 119 |
| Одесское | 19 | 156 |
| Баево | 22 | 138 |
| Цимлянск | 5 | 45 |
| Общее количество | 311 | 2280 |

| Исходная классификация | Объединенная классификация |
|---|---|
| Облака вертикального развития | |
| Кучевые плоские (Cu hum) | В зимней классификации отсутствуют |
| Кучевые средние и мощные (Cu med/cong) | |
| Кучево-дождевые лысые (Cb calv) | |
| Кучево-дождевые волосатые (Cb cap) | |
| Нижний ярус | |
| Слоисто-кучевые кучевообразные (Sc cuf) | Слоисто-кучевые кучевообразные (Sc cuf) |
| Слоисто-кучевые волнистообразные (Sc und) | Слоисто-кучевые волнистообразные (Sc und) |
| Слоистые (St) | Слоистые (St) |
| Слоистые разорванно-дождевые (St frnb) | |
| Слоисто-дождевые (Ns) | Слоисто-дождевые (Ns) |
| Сочетание кучевых и слоисто-кучевых, наблюдаемых одновременно (Cu & Sc) | Сочетание кучевых и слоисто-кучевых (Cu & Sc) |
| Средний ярус | |
| Высокослоистые (As) | Высокослоистые (As) |
| Высококучевые просвечивающие (один слой) (Ac trans) | Высококучевые волнистообразные (Ac und) |
| Высококучевые просвечивающие (несколько слоев) (Ac trans) | |
| Высококучевые неоднородные и чечевицеобразные (Ac inh/lent) | |
| Высококучевые непросвечивающие (один слой) (Ac op) | Высококучевые кучевообразные (Ac cuf) |
| Высококучевые, образовавшиеся из кучевых и кучево-дождевых (Ac sug/vir) | |
| Высококучевые башенковидные и хлопьевидные (Ac cast/floc) | |
| Верхний ярус | |
| Перистые когтевидные (Ci unc) | Перистые волокнистые (Ci fib) |
| Перистые перепутанные и хребтовидные (Ci int/vert) | |
| Перистые хлопьевидные (Ci floc) | Перистые плотные (Ci sp) |
| Перистые, образовавшиеся из навалов кучево-дождевых (Ci ing) | |
| Перисто-слоистые (распространяются по небу и уплотняются) (Cs_5) | Перисто-слоистые (Cs) |
| Перисто-слоистые (высота сплошной пелены над горизонтом > 45°) (Cs_6) | |
| Перисто-слоистые (10 баллов) (Cs_7) | |
| Перисто-слоистые (не распространяются по небу) (Cs_8) | |
| Перисто-кучевые (Cc) | Перисто-кучевые (Cc) |

¹Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Статистическая модель текстуры изображений облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 53-66.

²Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Статистическая модель физических параметров облачности на основе тематических продуктов MODIS // Исследование Земли из космоса. 2017. №5. С. 66-81.

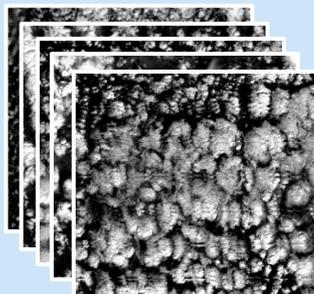
Текстурные признаки



| Обозначение | Признаки | Обозначение | Признаки |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Метод GLCM | | $T_{97} - T_{100}$ | Стандартное отклонение |
| $T_1 - T_4$ | Второй угловой момент | $T_{101} - T_{104}$ | Второй угловой момент |
| $T_5 - T_8$ | Энтропия | $T_{105} - T_{108}$ | Контраст |
| $T_9 - T_{12}$ | Максимальная вероятность | $T_{109} - T_{112}$ | Корреляция |
| $T_{13} - T_{16}$ | Локальная однородность | $T_{113} - T_{116}$ | Энтропия |
| $T_{17} - T_{20}$ | Инверсия | $T_{117} - T_{120}$ | Локальная однородность |
| $T_{21} - T_{24}$ | Дисперсия | $T_{121} - T_{124}$ | Кластерное затенение |
| $T_{25} - T_{28}$ | Контраст | $T_{125} - T_{128}$ | Кластерная рельефность |
| $T_{29} - T_{32}$ | Суммарное среднее | На основе яркости (ODSH) | |
| $T_{33} - T_{36}$ | Суммарная дисперсия | T_{129} | Первый начальный момент |
| $T_{37} - T_{40}$ | Суммарная энтропия | T_{130} | Энтропия |
| $T_{41} - T_{44}$ | Дифференциальная дисперсия | T_{131} | Энергия |
| $T_{45} - T_{48}$ | Дифференциальная энтропия | T_{132} | Вариация |
| $T_{49} - T_{52}$ | Корреляция | Физические параметры облаков | |
| $T_{53} - T_{56}$ | Информационная мера -1 | T_{133} | Оптическая толщина |
| $T_{57} - T_{60}$ | Информационная мера -2 | T_{134} | Эффективный радиус частиц |
| Метод GLDV | | T_{135} | Водозапас |
| $T_{61} - T_{64}$ | Математическое ожидание | T_{136} | Фазовый состав (Оптика) |
| $T_{65} - T_{68}$ | Стандартное отклонение | T_{137} | Фазовый состав (ИК) |
| $T_{69} - T_{72}$ | Второй угловой момент | T_{138} | Коэффициент отражения |
| $T_{73} - T_{76}$ | Энтропия | T_{139} | Высота верхней границы |
| $T_{77} - T_{80}$ | Локальная однородность | T_{140} | Температура верхней границы |
| $T_{81} - T_{84}$ | Контраст | T_{141} | Давление на верхней границе |
| $T_{85} - T_{88}$ | Кластерное затенение | T_{142} | Эффективная излучательная способность |
| $T_{89} - T_{92}$ | Кластерная рельефность | T_{143} | Температура нижней границы |
| Метод SADH | | T_{144} | Испаряемость |
| $T_{93} - T_{96}$ | Математическое ожидание | | |

Статистическая модель облачности

Типы облачности (12)



Характерные изображения



Текстурные признаки (132)
Физические параметры (12)



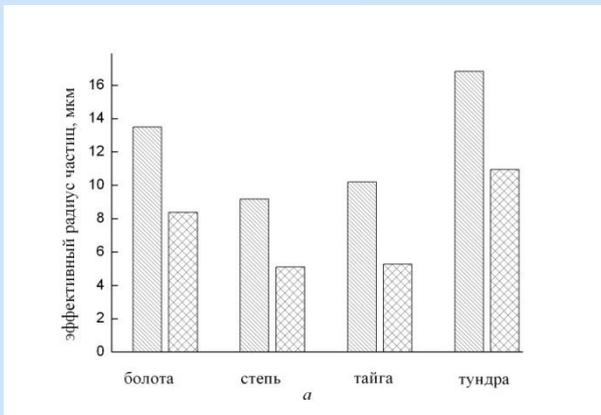
Законы распределения:
Вейбулла I(α, β)
Гамма II(α, β)
Лог-логистическое III(α, β)
Логнормальное IV(σ, μ)
Нормальное V(σ, μ)
Гумбеля (min) VI(σ, μ)
Гумбеля (max) VII(σ, μ)

Критерий Колмогорова-Смирнова

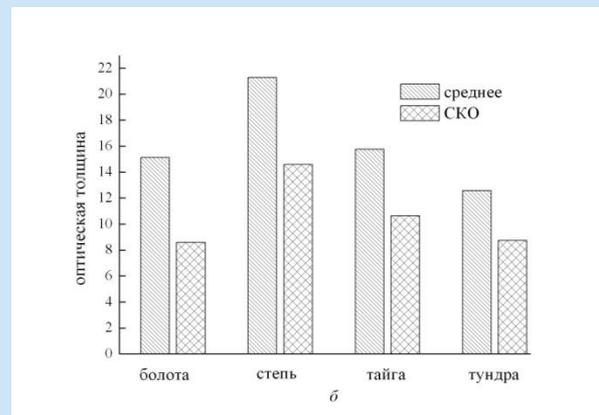
$$D_m = \sup_{x \in X} |F(x) - F_m^*(x)|$$



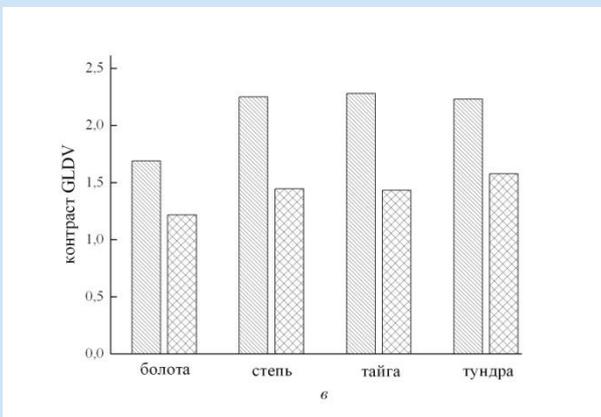
| Характеристики для высококучевых волнистообразных (Ac und) | Природная зона | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Болота | Степь | Тайга | Тундра |
| Текстурные признаки | | | | |
| Контраст GLCM | III(3,39; 0,01) | III(3,13; 0,01) | III(2,94; 0,01) | III(2,84; 0,01) |
| Дисперсия GLCM | I(1,18; 0,30) | I(1,23; 0,28) | I(1,36; 0,27) | I(1,54; 0,28) |
| Стандартное отклонение GLDV | VII(0,02; 0,07) | VII(0,02; 0,08) | VII(0,02; 0,08) | VII(0,02; 0,08) |
| Контраст GLDV | III(3,42; 0,01) | III(3,05; 0,01) | III(2,95; 0,01) | III(2,82; 0,01) |
| Физические параметры | | | | |
| Температура верхней границы | IV(0,05; -0,66) | IV(0,05; -0,59) | IV(0,05; -0,62) | IV(0,09; -0,67) |
| Водозапас | II(3,73; 0,003) | II(2,87; 0,004) | II(2,99; 0,003) | II(15,4; 0,03) |
| Оптическая толщина | I(1,74; 0,11) | I(1,7; 0,16) | I(1,38; 0,12) | I(1,31; 0,10) |
| Эффективный радиус частиц | III(3,76; 0,12) | III(5,03; 0,08) | III(5,20; 0,09) | III(3,37; 0,14) |



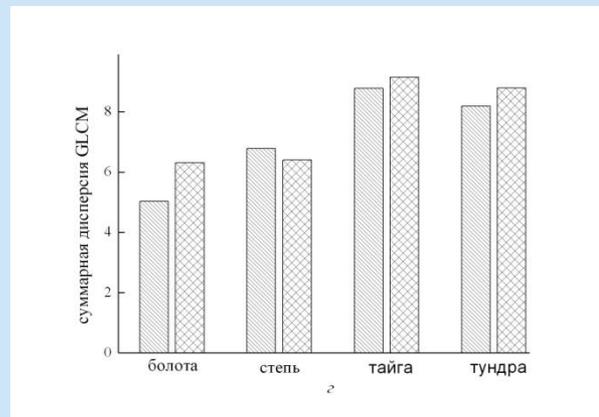
Эффективный радиус частиц A_c und



Оптическая толщина A_c und



Контраст GLDV A_c und



Суммарная дисперсия GLDV A_c und

Сравнительный анализ полученных моделей подтверждают зависимость текстурных признаков и физических параметров облаков от климатических особенностей рассматриваемых регионов

Использование региональных статистических моделей для классификации облаков является целесообразным.

Сравнительный анализ «зимней» и «летней» статистических моделей характеристик облачности

Основные результаты сравнения «летней»^{1,2} и «зимней» статистических моделей, усреднённых по всем природным зонам:

– наличие снежного покрова оказывает наибольшее влияние на значения некоторых текстурных признаков таких просвечивающих и разорванных типов облачности, как перистые нитевидные, слоистые, перисто-слоистые, высококучевые кучевообразные и волнистообразные;

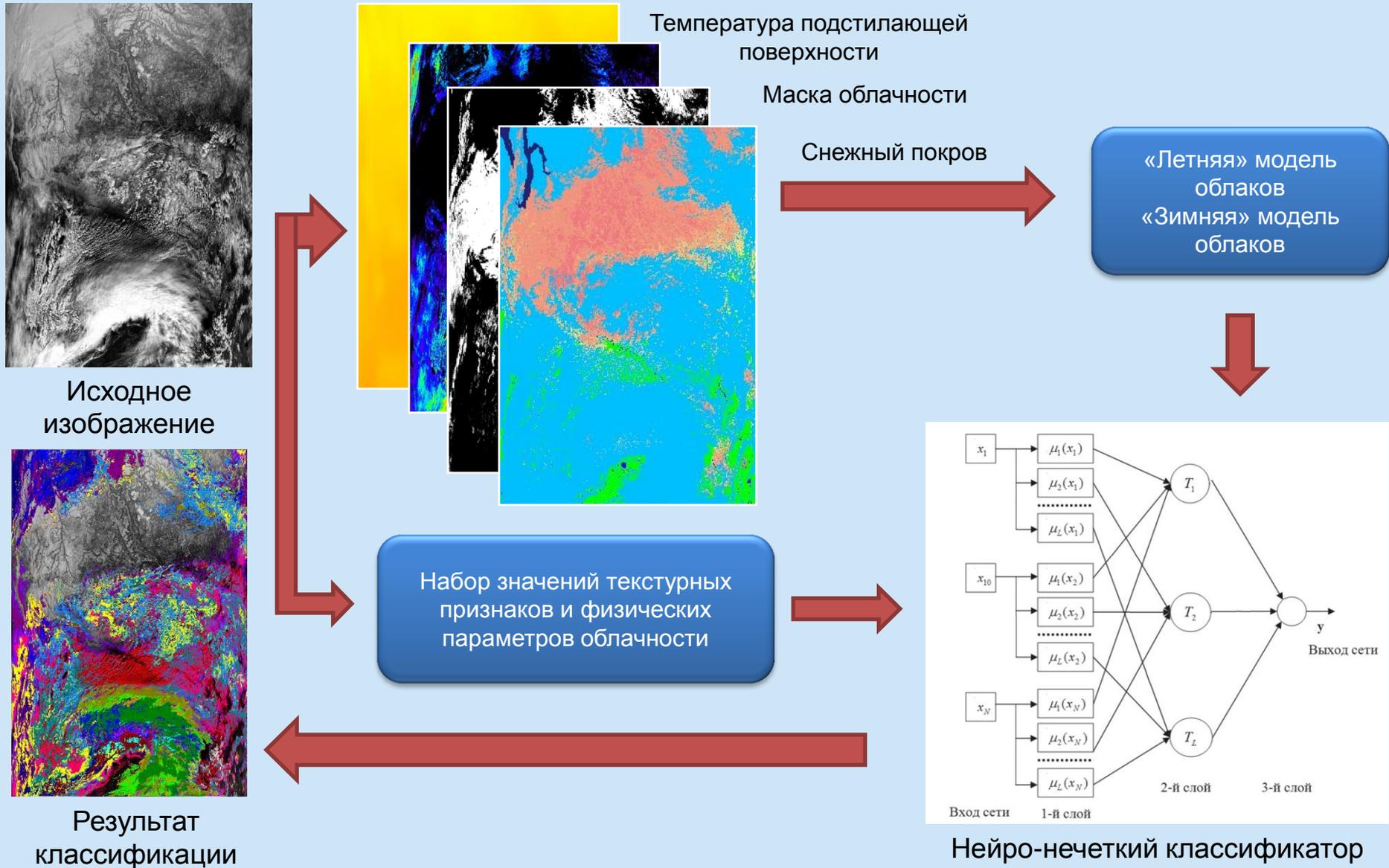
– флуктуации значений физических параметров оптически плотной облачности выражены менее ярко, в особенности у слоисто-дождевой и высокослоистой;

– величина зенитного угла солнца, отличающегося в «летнее» и «зимнее», оказывает существенное влияние на значения текстурных признаков по методу ODSH, в основе которых лежат значения яркости изображений облачности на спутниковых снимках;

– средние значения и среднеквадратические отклонения значений характеристик верхней границы облачности (высота, давление и температура) в «зимнее» время в целом меньше, чем в «летнее», что хорошо согласуется с результатами работ Чернокульского А.В.

¹Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Статистическая модель текстуры изображений облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 53-66.

²Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Статистическая модель физических параметров облачности на основе тематических продуктов MODIS // Исследование Земли из космоса. 2017. №5. С. 66-81.



Нейро-нечеткий классификатор

Представление модели нечеткого вывода в виде структуры, содержащей нейроны термы с единичными синаптическими коэффициентами, функционирующей по аналогии с классическими нейронными сетями называется **нейро-нечетким (гибридным) классификатором**.

Вход сети: предьявляется набор значений T_j классификационных характеристик облаков.

Первый слой: содержит нейроны-фазсификаторы, выполняющие приведение к нечеткости значений параметров облачности. В классической реализации для этого используется функция Гаусса

$$f = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T_j - \mu}{\sigma}\right)^2}.$$

Второй слой: состоит из 16 нейронов-антецедентов, реализующих треугольную норму и моделирующую логическую операцию «И». В данном слое происходит определение степени истинности условий для каждого правила системы нечеткого вывода.

Третий слой: содержит нейроны-консеквенты, реализующие произвольную треугольную конорму и моделирующую логическую операцию «ИЛИ». В данном слое происходит аккумуляция заключений.

Выход сети: тип облачности, к которому принадлежит классифицируемый фрагмент спутниковых данных.

Классификаторы такого типа моделируют выражения «Если образец имеет такие значения параметров, такие,... и такие, то он может относиться к одному классу, с одной степенью принадлежности, ко второму с другой и т.д.»



(3200 Hz, 2 ядра с поддержкой multi-threading)
Время обработки снимка 8120×5416 > 10 часов



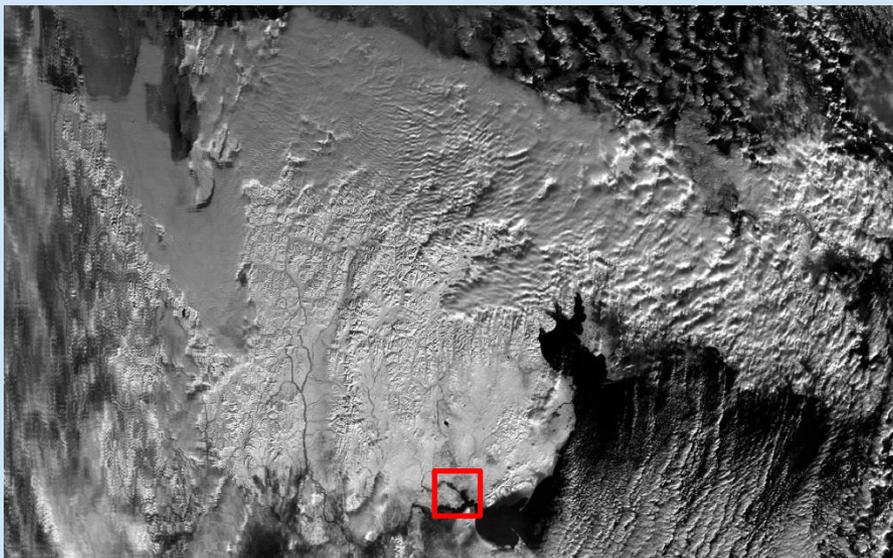
GeForce GTX 780 (863 MHz, 2304 ядер CUDA)
Время обработки снимка 8120×5416 ≈ 20 - 30 минут



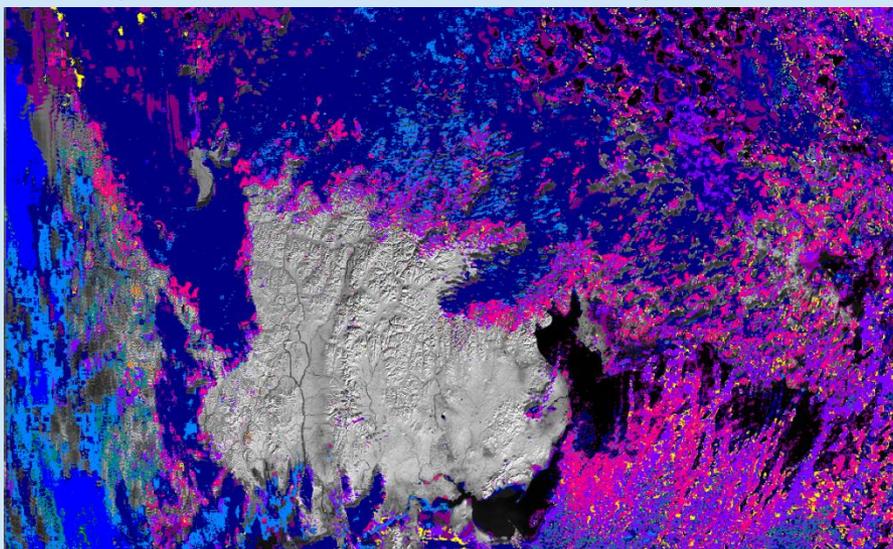
2 x GeForce GTX 1080 Ti (1620 MHz, 3584 ядер CUDA)
Время обработки снимка 8120×5416 < 1 минуты

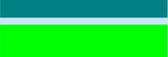
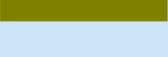
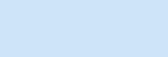


Результат классификации



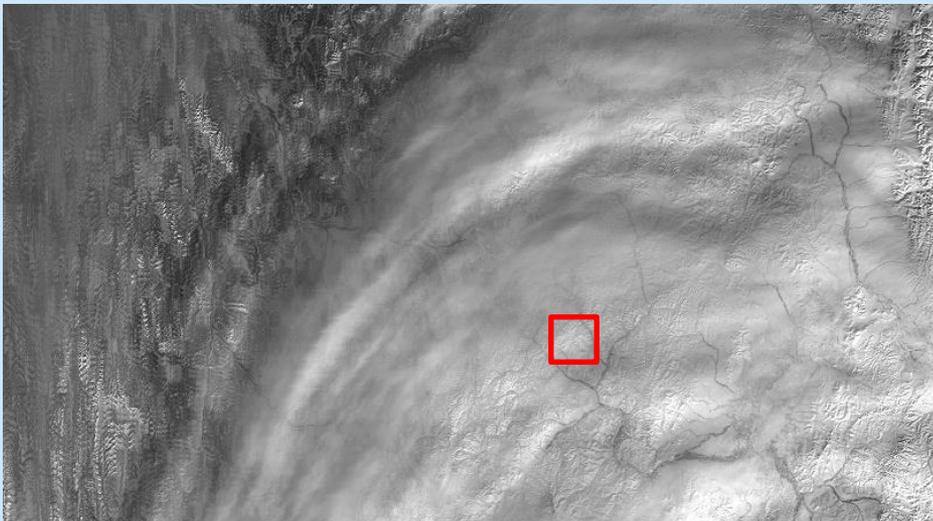
Фрагмент изображения Тихоокеанского побережья РФ от 20.10.2010 г



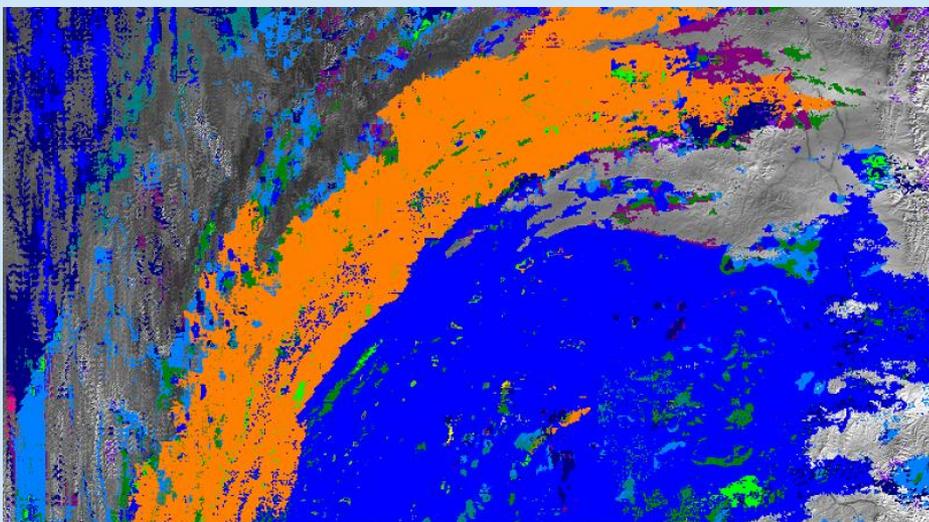
| | |
|---|--------------------|
|  | Cu hum |
|  | Cu med/cong |
|  | Cb calv |
|  | Sc cuf |
|  | Sc und |
|  | St |
|  | Cu & Sc |
|  | Cb cap |
|  | As |
|  | Ns |
|  | Ac und |
|  | Ac cuf |
|  | Ci fib |
|  | Ci sp |
|  | Cs |
|  | Cc |

Результат классификации облачности с использованием «зимней» модели

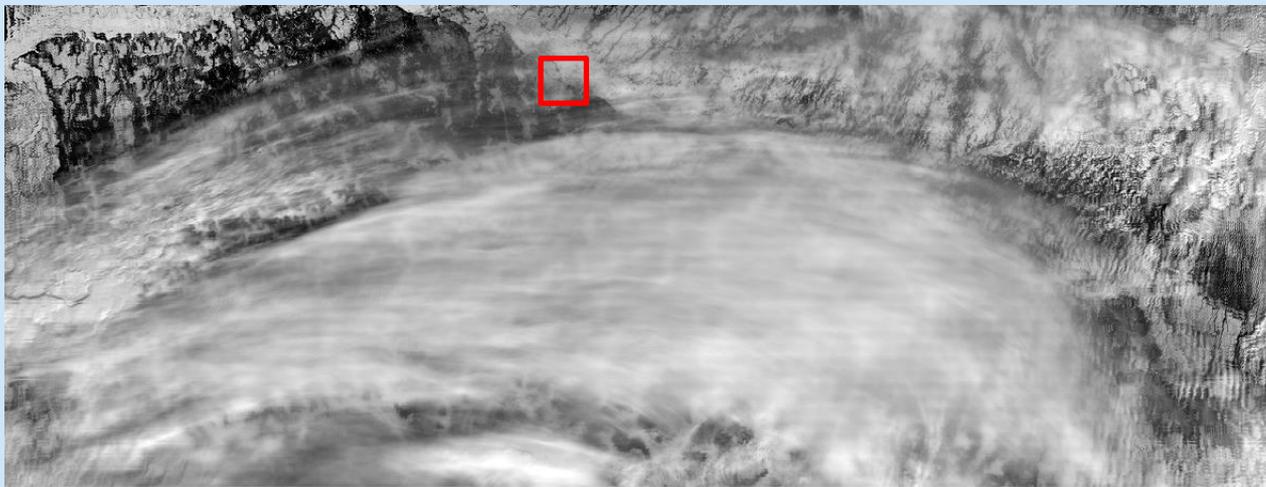
Результат классификации



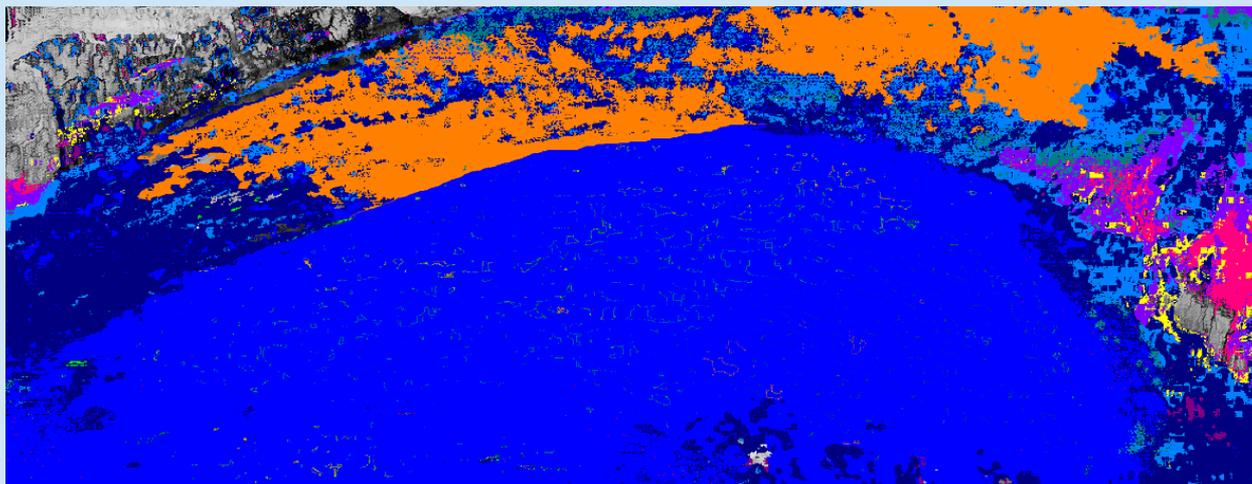
Фрагмент изображения Чукотского АО от 18.02.2013 г



Результат классификации



Фрагмент изображения Ханты-Мансийского АО от 27.03.2016 г



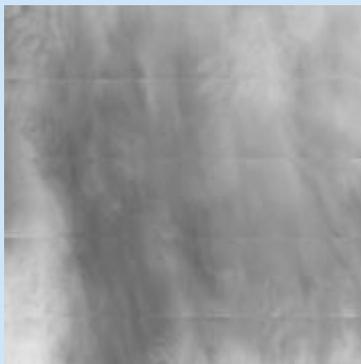
Результат классификации облачности с использованием «зимней» модели

Результаты классификации

| Тип облачности | Эффективность «зимней» классификации, % |
|---|---|
| Нижний ярус | |
| Слоисто-кучевые кучевообразные (Sc cuf) | 74 |
| Слоисто-кучевые волнистообразные (Sc und) | 92 |
| Слоистые (St) | 86 |
| Сочетание кучевых и слоисто-кучевых (Cu & Sc) | 56 |
| Средний ярус | |
| Высокослоистые (As) | 82 |
| Слоисто-дождевые (Ns) | 88 |
| Высококучевые волнистообразные (Ac und) | 92 |
| Высококучевые кучевообразные (Ac cuf) | 74 |
| Верхний ярус | |
| Перистые волокнистые (Ci fib) | 54 |
| Перистые плотные (Ci sp) | 94 |
| Перисто-слоистые (Cs) | 60 |
| Перисто-кучевые (Cc) | 96 |
| Средняя эффективность классификатора | 79 |

Средняя эффективность «летней» классификации 85%

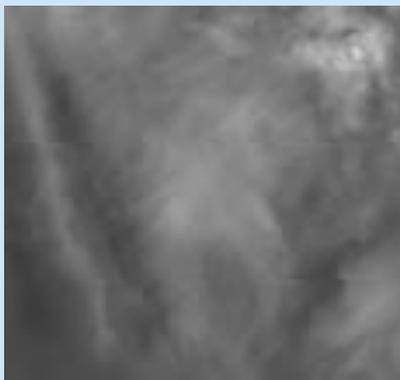
Ошибки классификации



Перисто-слоистые (Cs)

Вероятность правильной классификации 0,6

Ошибочное «мнение» классификатора



Перистые плотные (*Ci sp*)

Вероятность ошибки 0,38



Высокослоистые (*As*)

Вероятность ошибки 0,02

Основные выводы

- Использование региональных статистических моделей является целесообразным при классификации облаков по спутниковым данным, позволяющим учитывать региональные особенности характеристик облачности и тип подстилающей поверхности;
- Применение статистической модели параметров облаков в периоды залегания снежного покрова улучшает результаты распознавания оптически тонкой слоистообразной облачности и «разорванных» облаков среднего яруса над заснеженными территориями;
- Отмечена изменчивость некоторых физических параметров и текстурных признаков различных типов облачности над рассмотренными природными зонами: болота, тайга, тундра и степи;
- Построенные статистические модели текстурных признаков и физических параметров облаков могут быть использованы для решения региональных задач климатологии и метеорологии;
- Комплексное применение «летней» и «зимней» классификации является более надежным подходом к распознаванию типов облачности с учетом изменчивости их характеристик.

Скороходов Алексей Викторович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)

пл. Академика Зуева, 1, 634055, г. Томск, Россия

+7-923-401-60-70

E-mail: vazime@yandex.ru