



**ИНСТИТУТ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ**  
ИМЕНИ В.Е. ЗУЕВА СО РАН

# **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА АТМОСФЕРНОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЛАЧНОСТИ ПО ДАННЫМ MODIS**

Скороходов А.В., Астафуров В.Г.

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

## Аннотация

Идентификация зон атмосферных фронтов и определение их типов относится к числу основных задач, решаемых при составлении прогнозов погоды. На данный момент времени существуют алгоритмы автоматического выделения фронтальных зон. В данной работе предлагается методика определения типа атмосферного фронта путем применения результатов классификации облачности по спутниковым данным MODIS с различным пространственным разрешением. Ее основная идея заключается в анализе проклассифицированных мезосистем облаков, соответствующих фронтальным зонам, и поиске на спутниковых снимках определенных последовательностей комбинаций типов облачности, характерных для конкретного типа атмосферного фронта. Облака классифицируются на 16 разновидностей в соответствии с метеорологическим стандартом. Показаны результаты использования статистических моделей текстуры изображений и физических параметров облачности для решения задачи ее классификации. Обсуждаются результаты определения типа атмосферного фронта на спутниковых снимках Томской области, полученных в 2016 и 2017 году.

# Фронтальный анализ

Стандартный алгоритм выделения фронтов на картах погоды, используемый синоптиками, заключается в следующем:

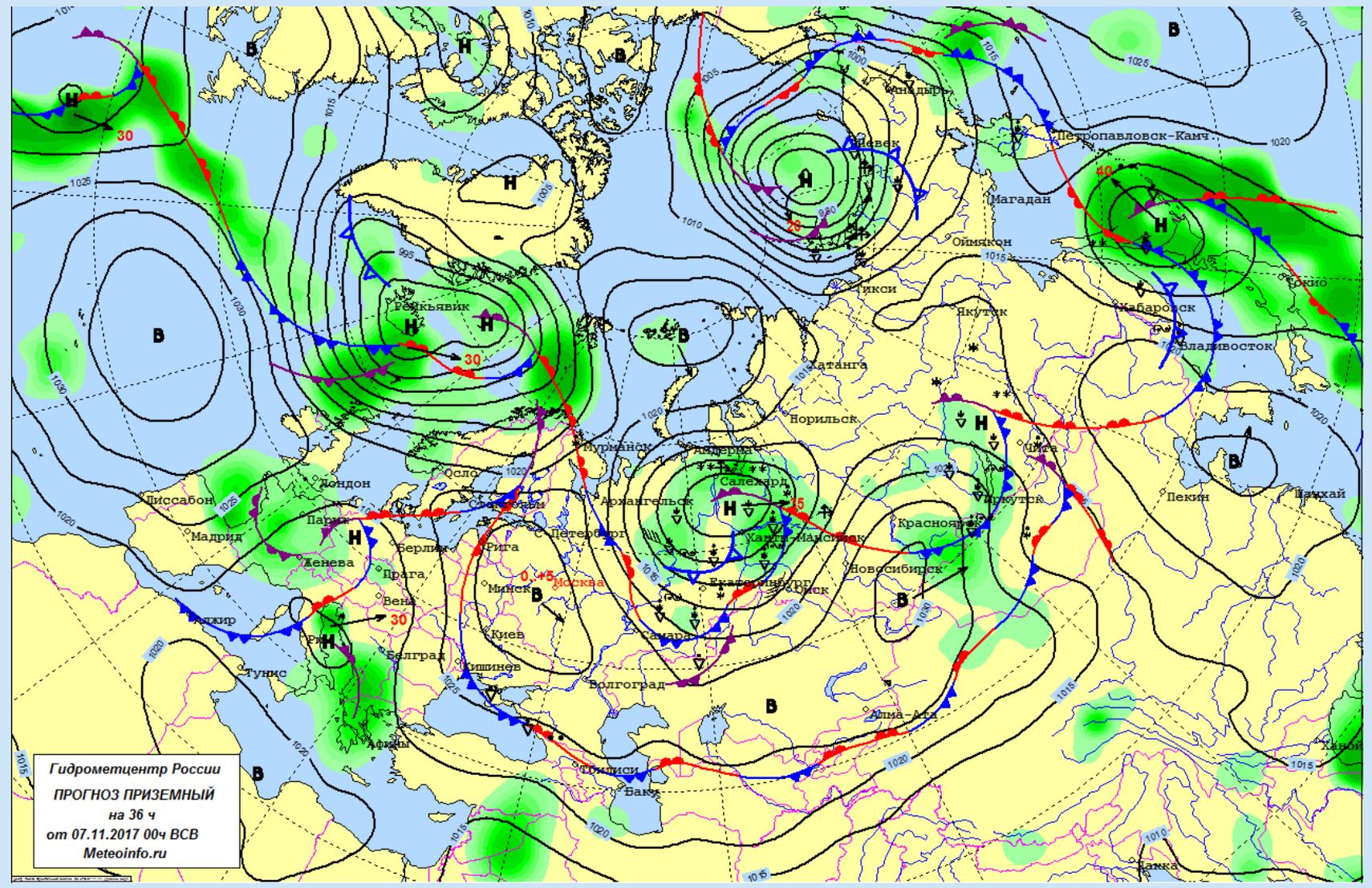
- 1) Наносятся данные о погоде на основе измерений сети метеостанций;
- 2) Проводятся изобары;
- 3) Находятся зоны осадков и облачности;
- 4) Анализируется рельеф подстилающей поверхности и направление ветра;
- 5) Выделяются узкие зоны, разделяющие теплые и холодные воздушные массы, в которых проводятся линии фронтов.

В настоящее время для выделения фронтальных зон используется безразмерный фронтальный параметр:

$$F = p + \Psi,$$

где  $p$  – вероятность наличия фронта в исследуемом квадрате, определяемая на основе ряда предикторов и дискриминантного анализа, а  $\Psi$  – характеристика бароклинности в слое 850 – 500 или 925 – 700 гПа.

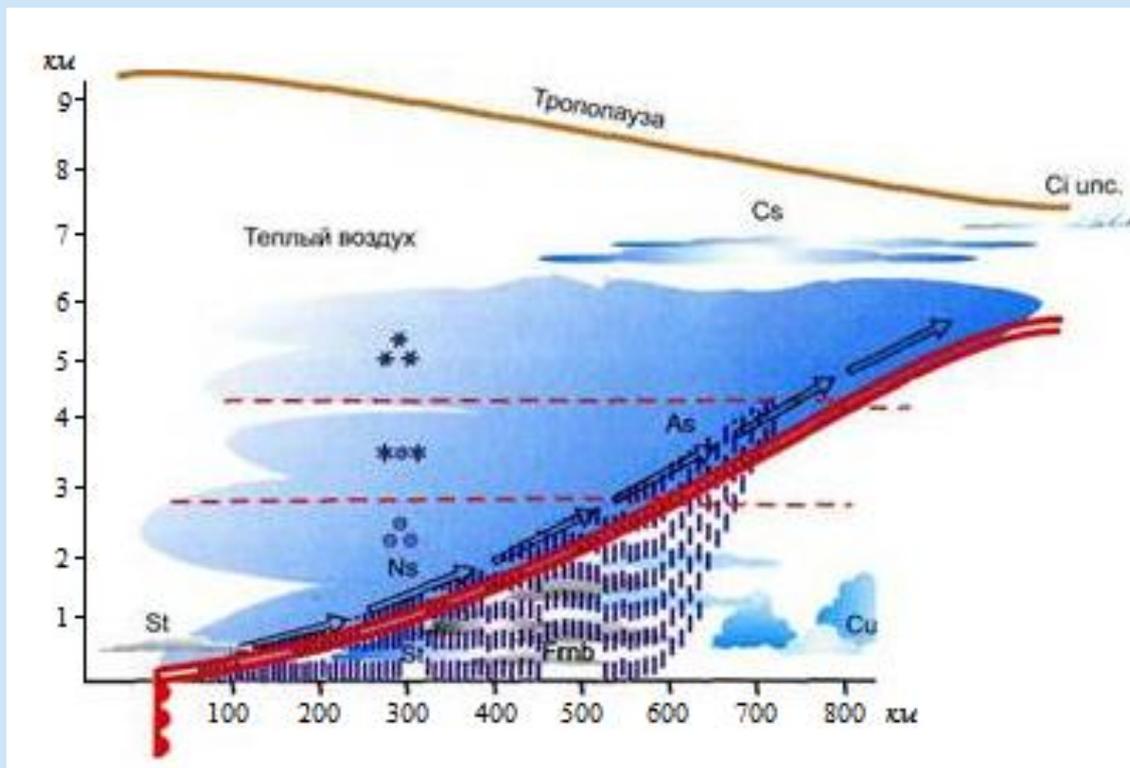
# Фронтальный анализ



<sup>1</sup>Гидрометцентр России [Электронный ресурс]. 2017. URL: <http://meteoinfo.ru/mapsynopfr>

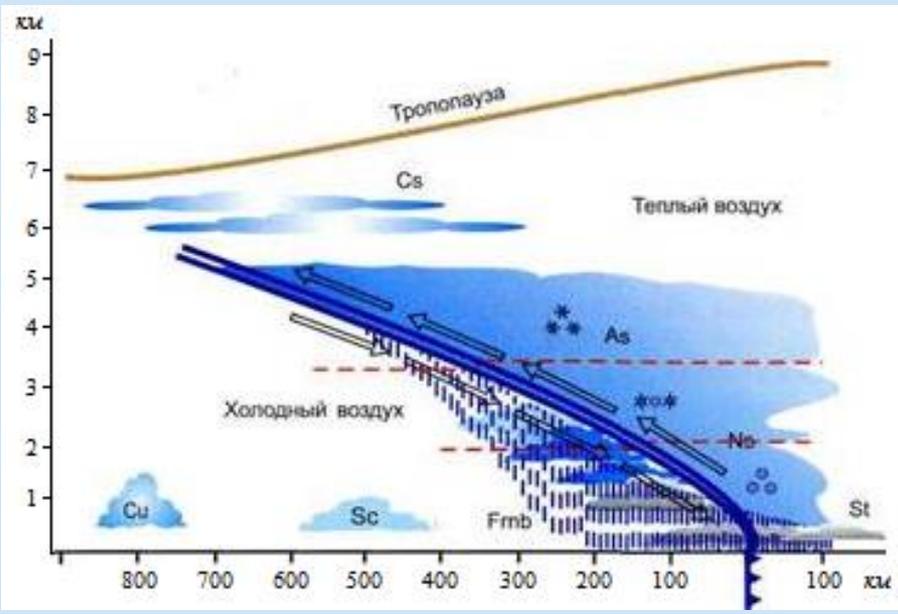


# Теплый фронт

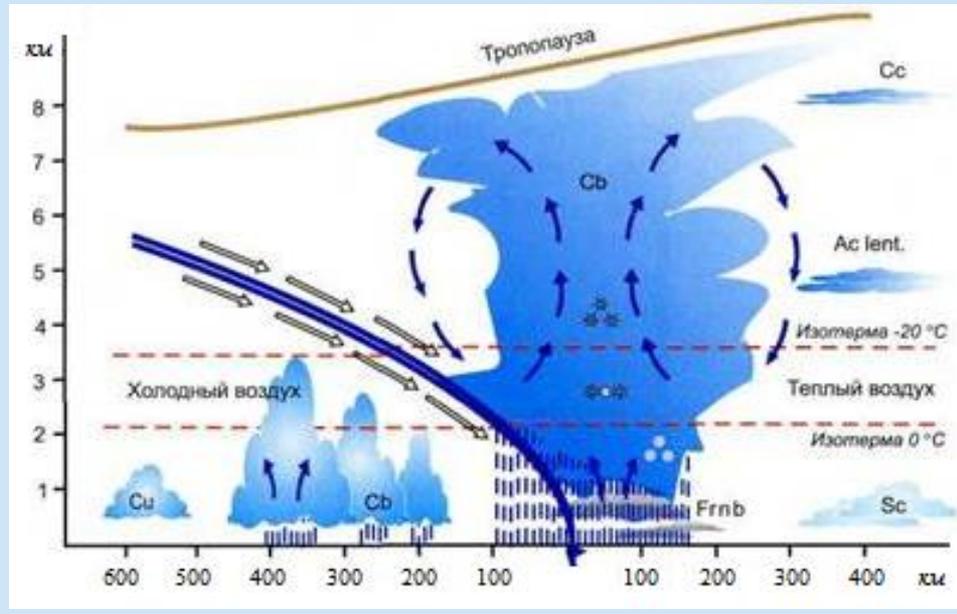


Система облаков теплого фронта  
(Ci unc → Cs(As trans) → As op(Ac) → Ns(Cb) → St)

# Холодный фронт

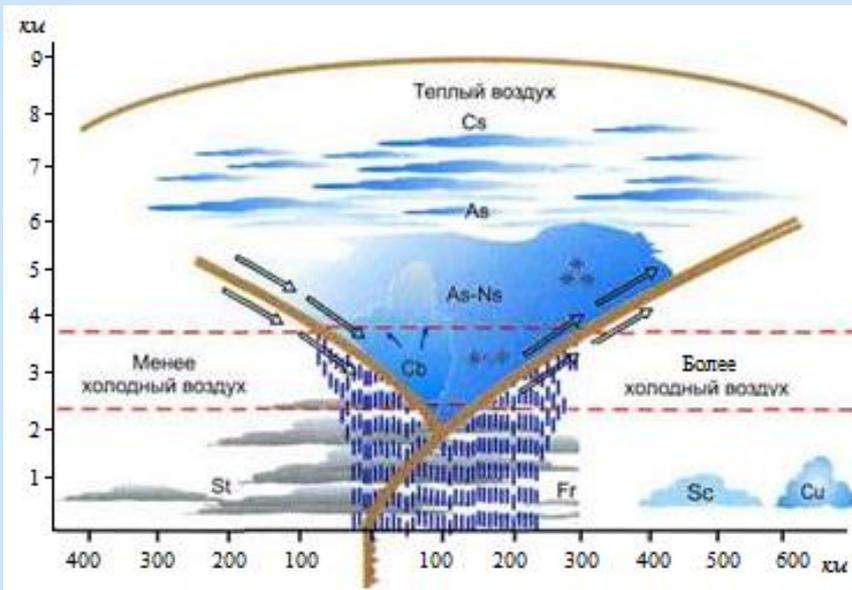


Система облаков холодного фронта  
первого рода  
(St → Ns(Cb) → As → Cs (Cu))

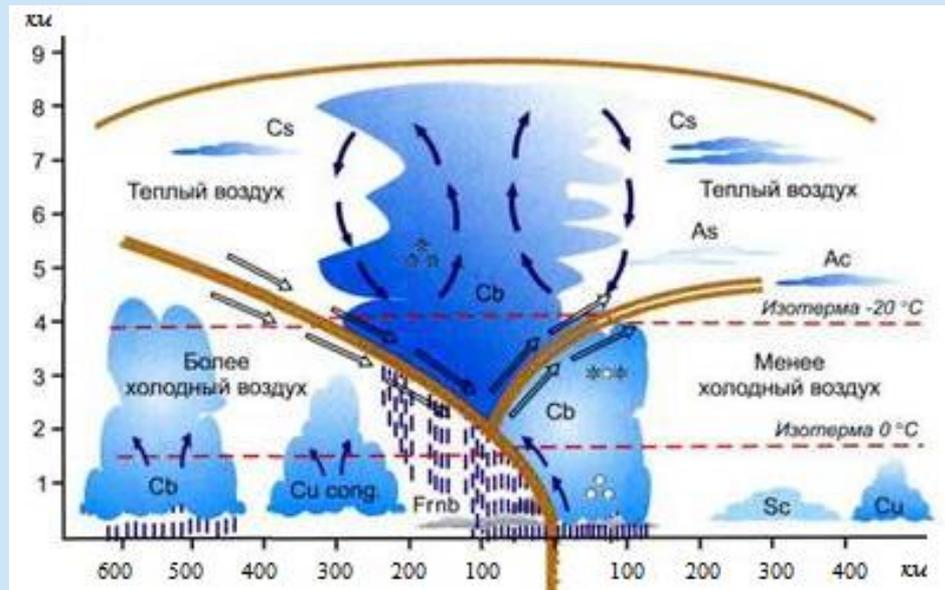


Система облаков холодного фронта  
второго рода  
(Ac(Cc) → Cs → Cb(hi) → Cb (low)) → Cu

## Фронт окклюзии



Система облаков фронта окклюзии по  
типу теплого фронта  
(Cu → Sc → As-Ns(Cs) → Cb(Cs) → St



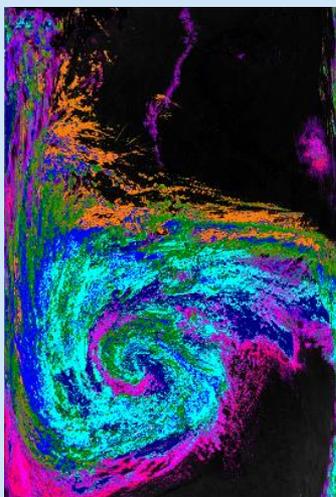
Система облаков фронта окклюзии по  
типу холодного фронта  
(Cu → Sc(Ac) → As(Cs) → Cb (Hi) →  
Cu cong(Cs) → Cb(Low))



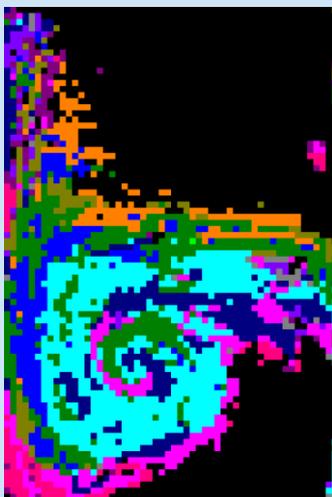
# Методика определения типа облачного фронта



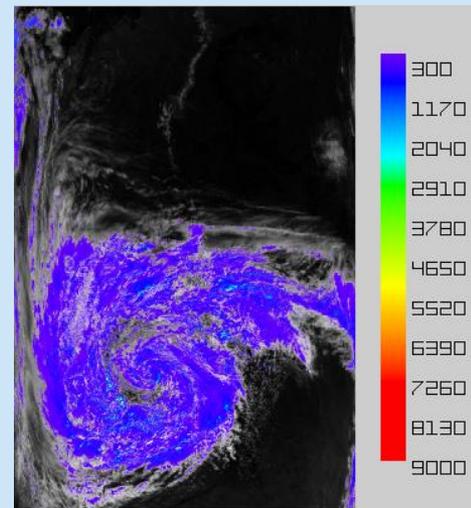
Исходный снимок



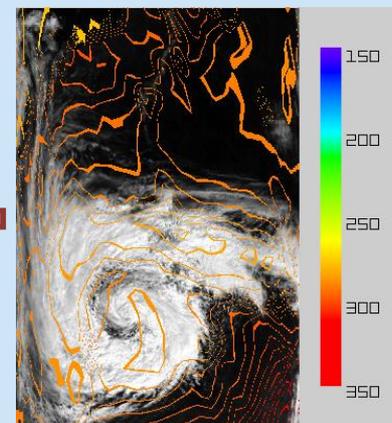
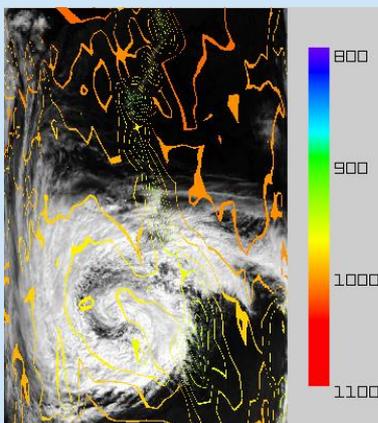
Результат классификации  
облачности



Построение мозаики



Выделение фронтальной  
облачности



Оценка изобар и изотерм



Сравнение  
порядка  
расположения  
облачности во  
фронтальной  
зоне с  
эталоном



Тип  
атмосферного  
фронта

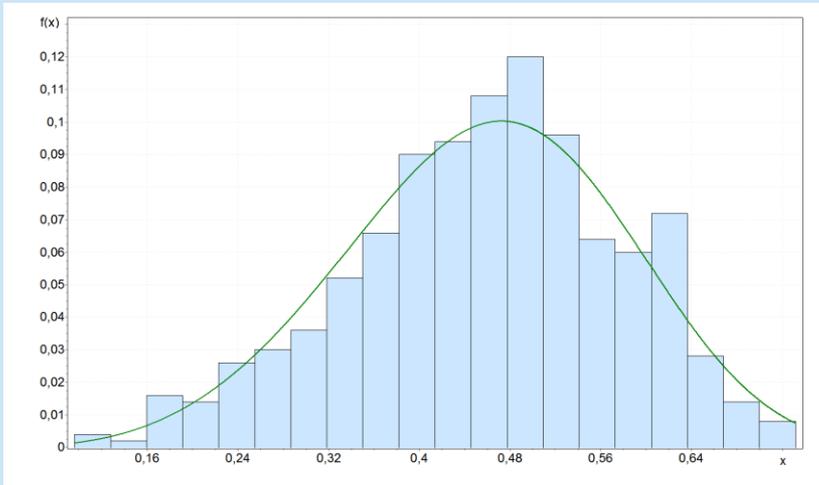
# Классификация облачности

Исходная классификация	Объединенная классификация
<b>Облака вертикального развития</b>	
Кучевые плоские (Cu hum)	—//—
Кучевые средние и мощные (Cu med/cong)	—//—
Кучево-дождевые лысые (Cb calv)	—//—
Кучево-дождевые волосатые (Cb cap)	—//—
<b>Нижний ярус</b>	
Слоисто-кучевые кучевообразные (Sc cuf)	—//—
Слоисто-кучевые волнистообразные (Sc und)	—//—
Слоистые (St)	Слоистые (St)
Слоистые разорванно-дождевые (St frnb)	
Слоисто-дождевые (Ns)	—//—
Сочетание кучевых и слоисто-кучевых, наблюдаемых одновременно (Cu & Sc)	—//—
<b>Средний ярус</b>	
Высокослоистые (As)	—//—
Высококучевые просвечивающие (один слой) (Ac trans)	Высококучевые волнистообразные (Ac und)
Высококучевые неоднородные и чечевицеобразные (Ac inh/lent)	
Высококучевые непросвечивающие (один слой) (Ac op)	
Высококучевые, образовавшиеся из кучевых и кучево-дождевых (Ac sug/vir)	Высококучевые кучевообразные (Ac cuf)
Высококучевые башенковидные и хлопьевидные (Ac cast/floc)	
<b>Верхний ярус</b>	
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 наковален 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)	—//—

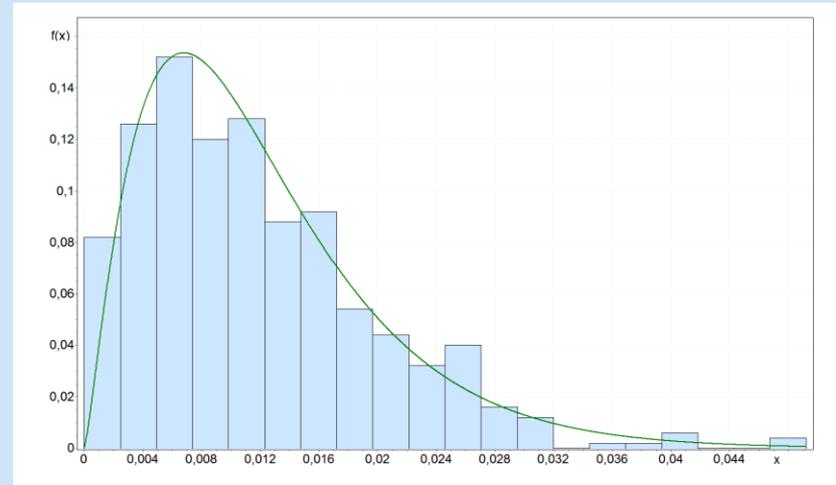
<sup>1</sup>Астафуров В.Г., Курьянович К.В., Скороходов А.В. Статистическая модель текстуры изображений облачного покрова по спутниковым данным // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 53-66.

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

# Статистические модели облачности



Распределение Вейбулла значений признака суммарная энтропия  $0^\circ$  (GLCM) у  $Cu\ hum$



Гамма распределение значений признака водозапас у  $Ci\ sp$

## 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.»

## Использование статистических моделей

Анализ статистических моделей текстуры изображений и физических параметров облачности показал, что флуктуации их значений описываются не только нормальным распределением. Поэтому предложено использование подобранных законов распределений и оценок их параметров для инициализации нейронов-фаззификаторов:

$$f(T_j) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{T_j}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\left( \frac{T_j}{\beta} \right)^\alpha} \quad \text{– Вейбулла}$$

$$f(T_j) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{T_j}{\beta} \right)^{\alpha-1} \left( 1 + \left( \frac{T_j}{\beta} \right)^\alpha \right)^{-2} \quad \text{– Лог-логистическое}$$

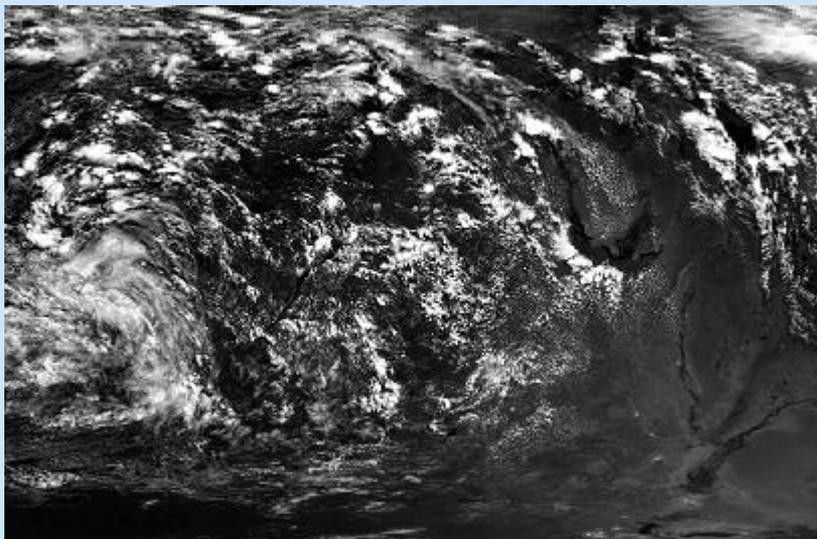
$$f(T_j) = \frac{(T_j)^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-\frac{T_j}{\beta}} \quad \text{– Гамма}$$

$$f(T_j) = \frac{1}{T_j \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln T_j - \mu}{\sigma} \right)^2} \quad \text{– Логнормальное}$$

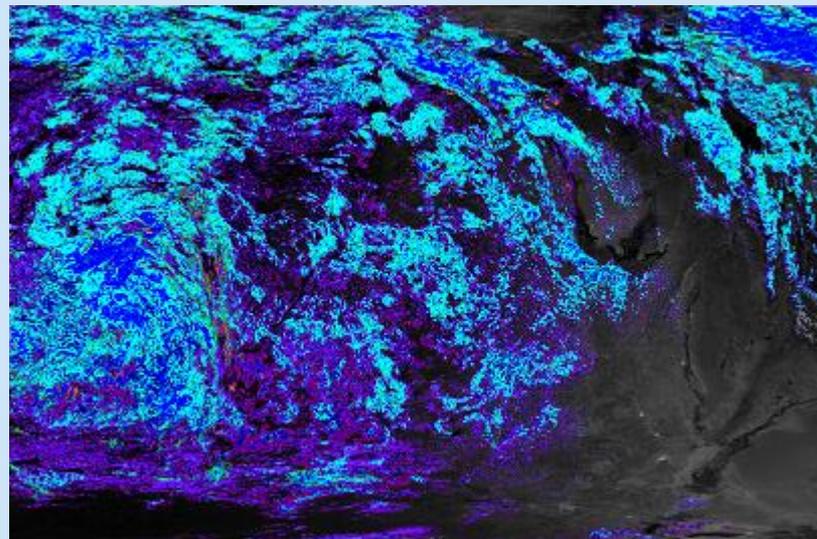
где вычисление  $\Gamma(\alpha)$  основано на использовании асимптотического разложения ее логарифма, что необходимо для устранения рекурсии при реализации алгоритма классификации с использованием технологии NVIDIA CUDA.

### Преимущества:

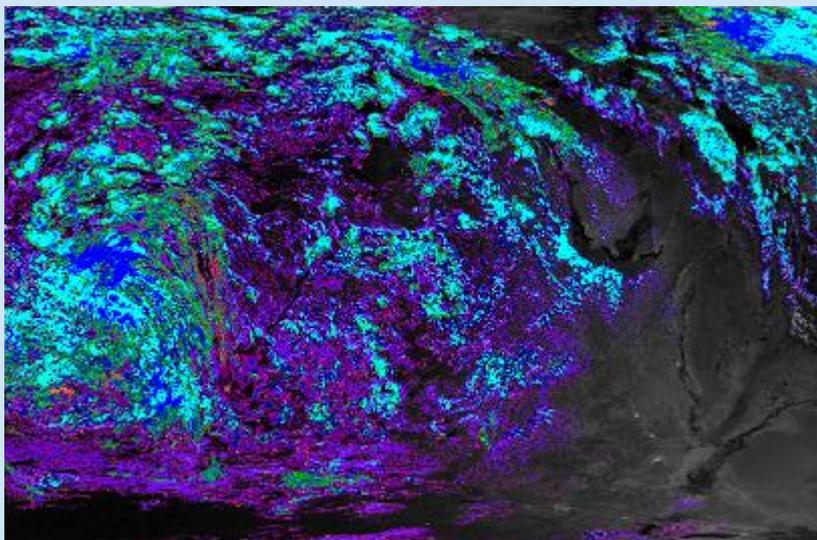
- фактическое отсутствие процедуры обучения нейронной сети,
- улучшение результатов классификации облачности,
- сохранение скорости обработки спутниковых данных.



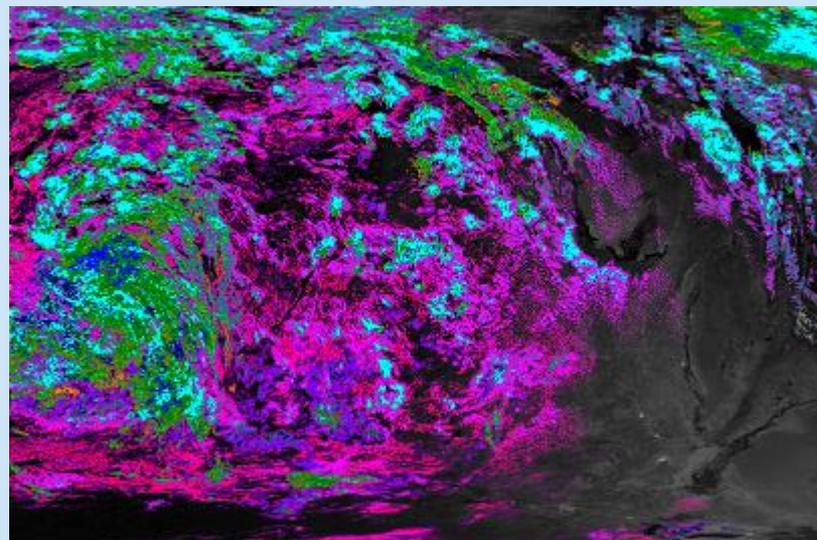
Исходный снимок



Полный набор признаков и функция Гаусса

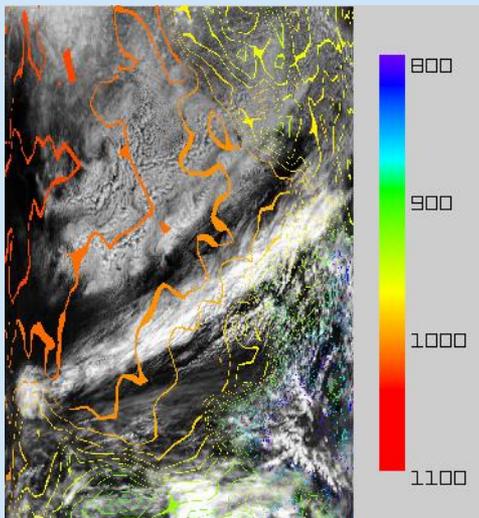


Информативные признаки и функция Гаусса

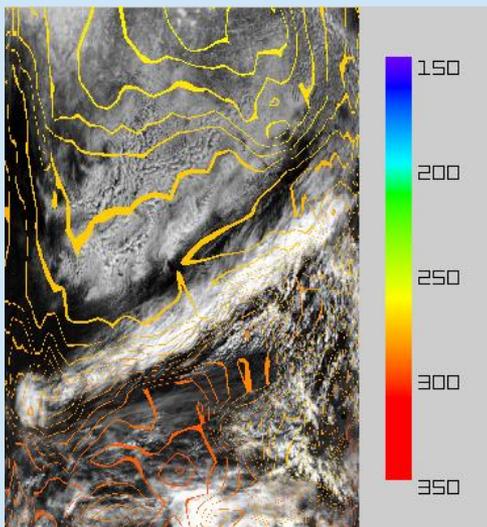


Информативные признаки и модель

# Результаты определения типа атмосферного фронта

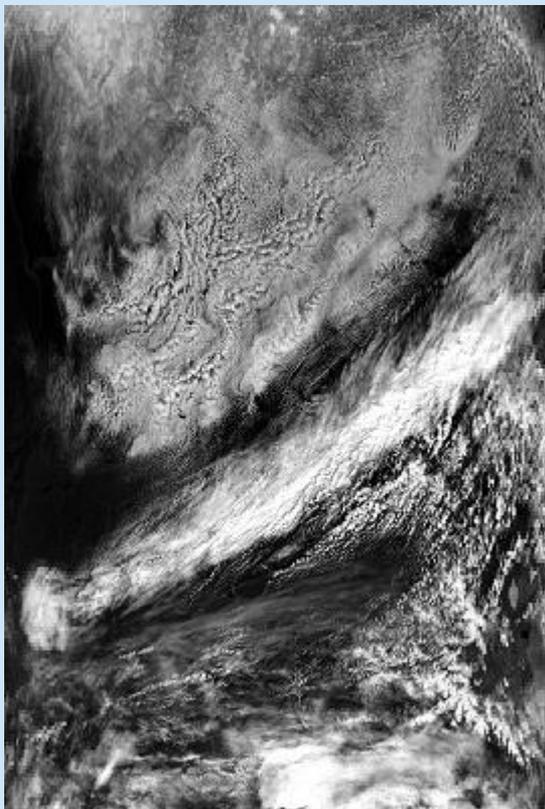


Изобары

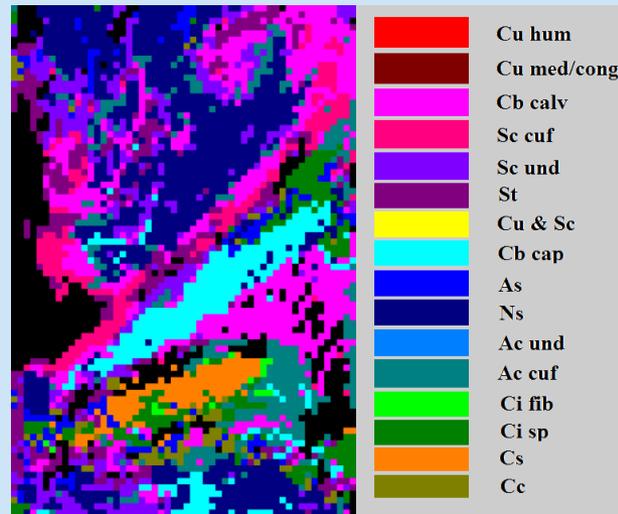


Изотермы

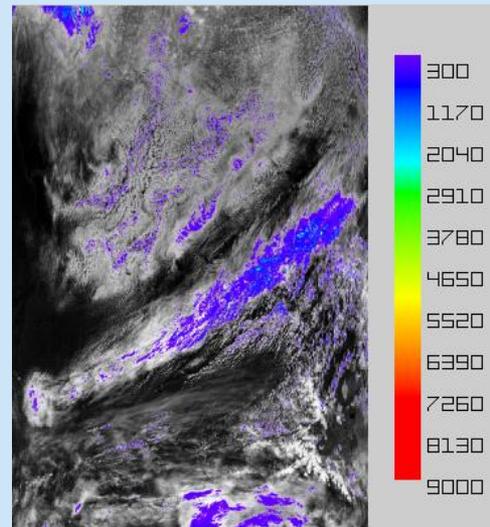
02.05.2016 г.  
(40° – 60° с.ш.; 80° – 100° в.д.)



Холодный фронт  
второго рода



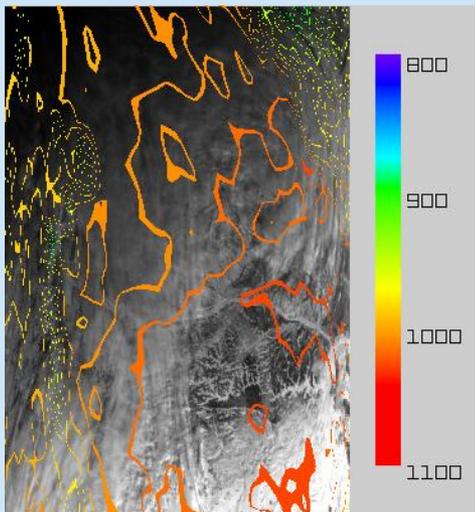
Мозаика облачности



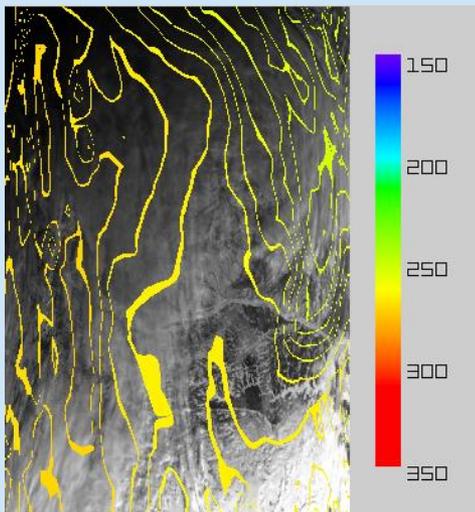
Фронтальные зоны

# Результаты определения типа атмосферного фронта

02.02.2016 г.  
(40° – 60° с.ш.; 80° – 100° в.д.)



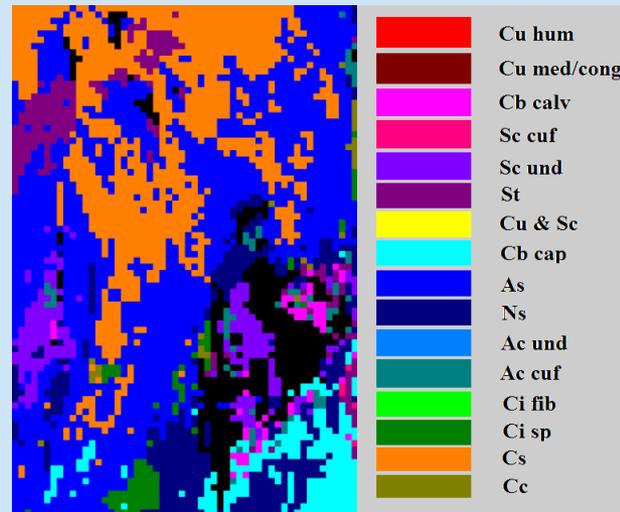
Изобары



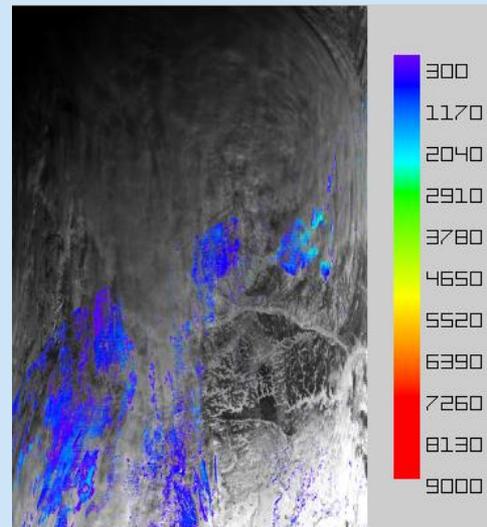
Изотермы



Теплый фронт

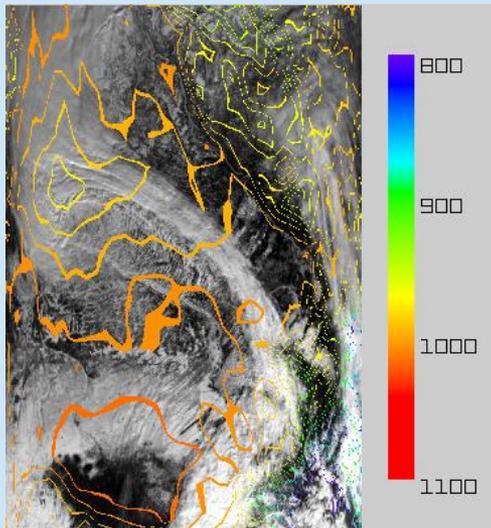


Мозаика облачности

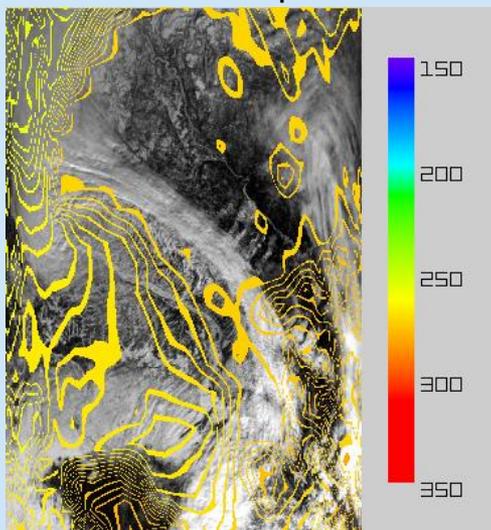


Фронтальные зоны

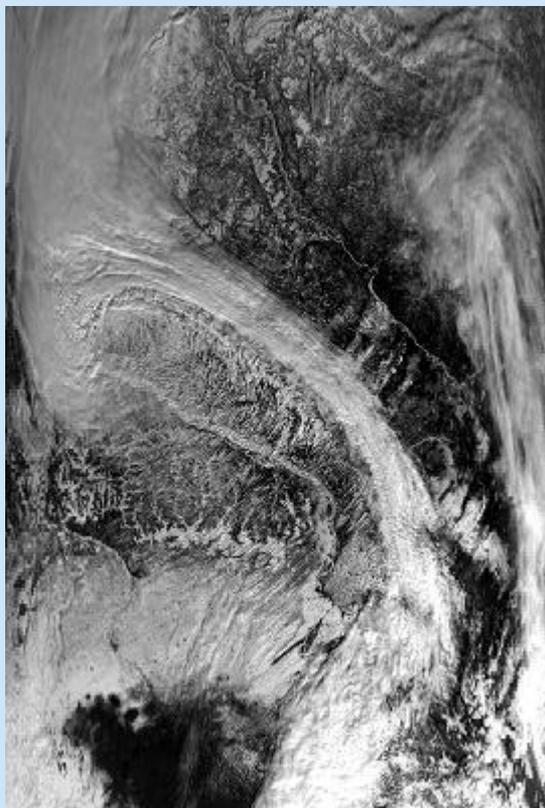
22.03.2016 г.  
(40° – 60° с.ш.; 80° – 100° в.д.)



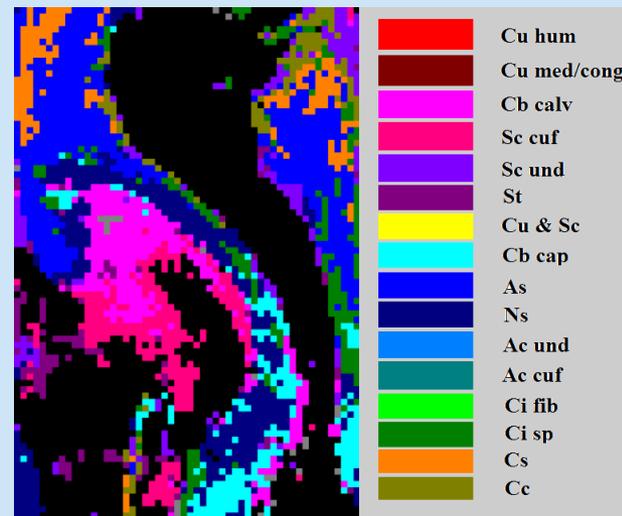
Изобары



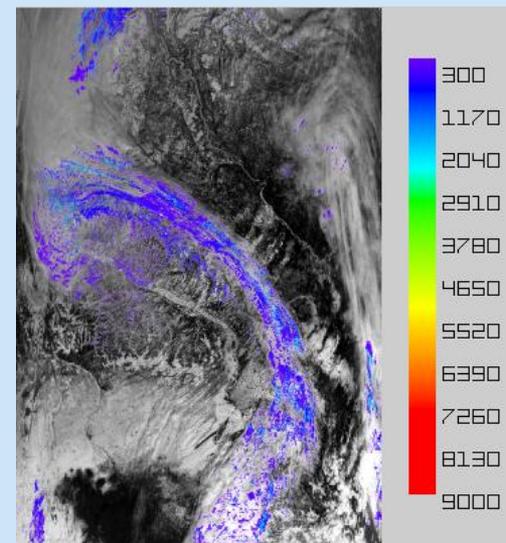
Изотермы



Теплый + холодный фронт второго рода =  
Фронт окклюзии по типу теплого фронта



Мозаика облачности



Фронтальные зоны

## Выводы

- Основным результатом работы является методика определения типа облачного фронта на основе результатов классификации облачности по спутниковым данным MODIS;
- Использование результатов построения статистических моделей текстуры изображений и физических параметров облачности для инициализации нейронечеткого классификатора является более эффективным подходом, чем использование только функций Гаусса;
- Апробация разработанной в рамках данной работы методики свидетельствует о ее применимости к эпизодам наблюдения на спутниковых снимках одновременно трех типов фронтов: холодного, теплого и окклюзии;
- Данная методика может рассматриваться в качестве дополнительного инструмента при составлении синоптических карт о последующих прогнозах погоды.

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*

*8 (3822) 49-22-56*

*E-mail: [vazime@yandex.ru](mailto:vazime@yandex.ru)*