

Использование данных лидара CALIOP для восстановления высоты нижней границы многослойной облачности по спутниковым снимкам MODIS на основе методов нечеткой логики

Скороходов А.В., Курьянович К.В.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №21-71-10076)

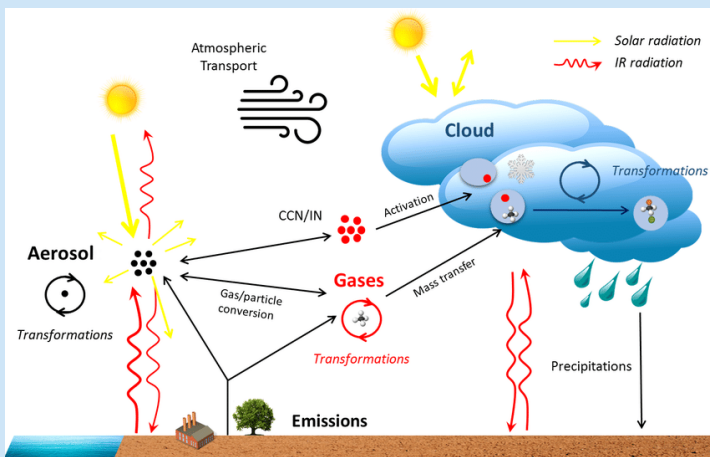
Актуальность задачи



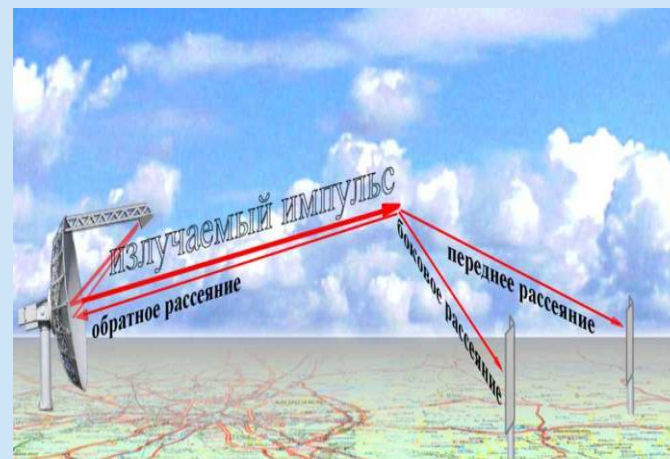
Обеспечение безопасности полетов воздушных судов, включая БПЛА



Оценка степени воздействия на радиационный перенос

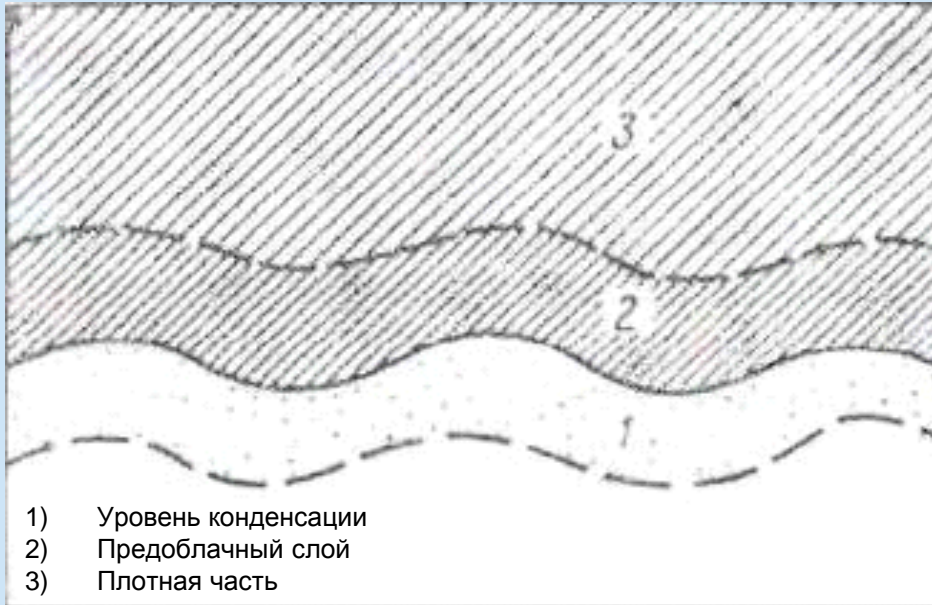


Оценка влияния на транспорт антропогенного и природного аэрозоля

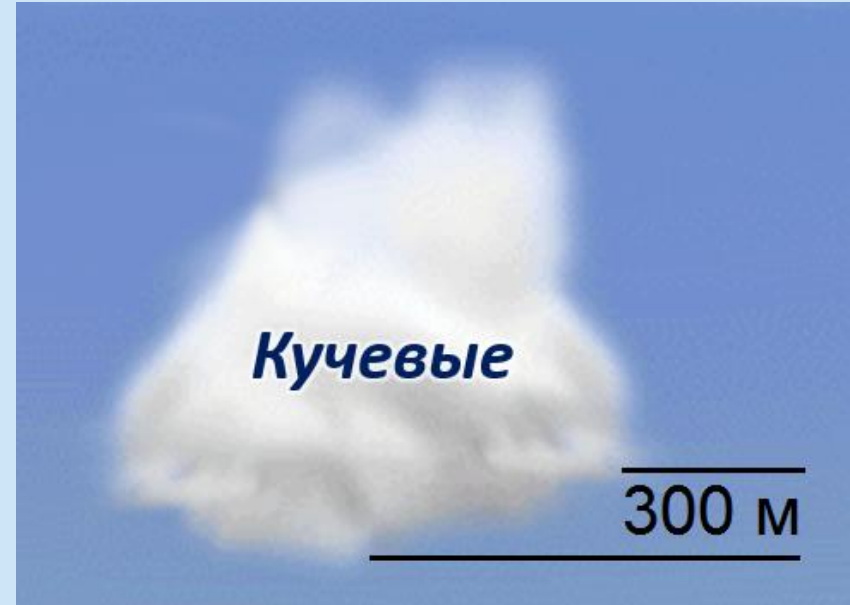


Оценка влияния на распространение радиолокационных сигналов

Сложность задачи



Структура нижней границы слоистообразных облаков



Разница высот основания в пределах отдельного облака

Метеорология: ВНГО → уровень конденсации

Авиация: ВНГО → плотная часть



Методы оценки ВНГО

Наземные

Светолокационные регистраторы:

- локальные,
- 3500 м,
- 100 м,
- 3 ч.

Лазерные регистраторы:

- локальные,
- 7500 м,
- 30 м,
- 30 мин.

Сканирующие лидары

- локальные,
- 20000 м,
- 30 м,
- непрерывно.

Спутниковые

Активные сенсоры

Лидар (CALIPSO):

- 1 км,
- 20000 м,
- 30 м
- 16 сут.

Радар (CloudSat)

- 1.4 км,
- 20000 м,
- 480 м,
- 16 сут.

Пассивные сенсоры:

- 20000 м,
- 2000 (3000) м,
- 10 мин.

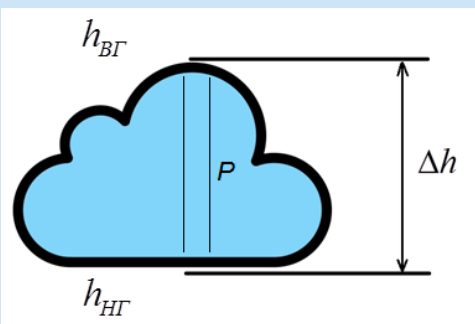
Самолетные

Пилотируемые

БПЛА

Методы оценки ВНГО (пассивное спутниковое зондирование)

Эмпирические
зависимости

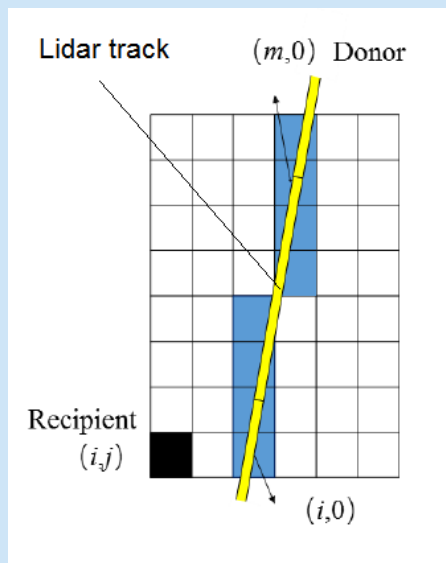


$$h_{HG} = h_{BG} - \Delta h$$

$$\Delta h = a \times P + b$$

P – водозапас

Доноры-
реципиенты



Машинное
обучение

Характеристики облаков
(пассивное зондирование)



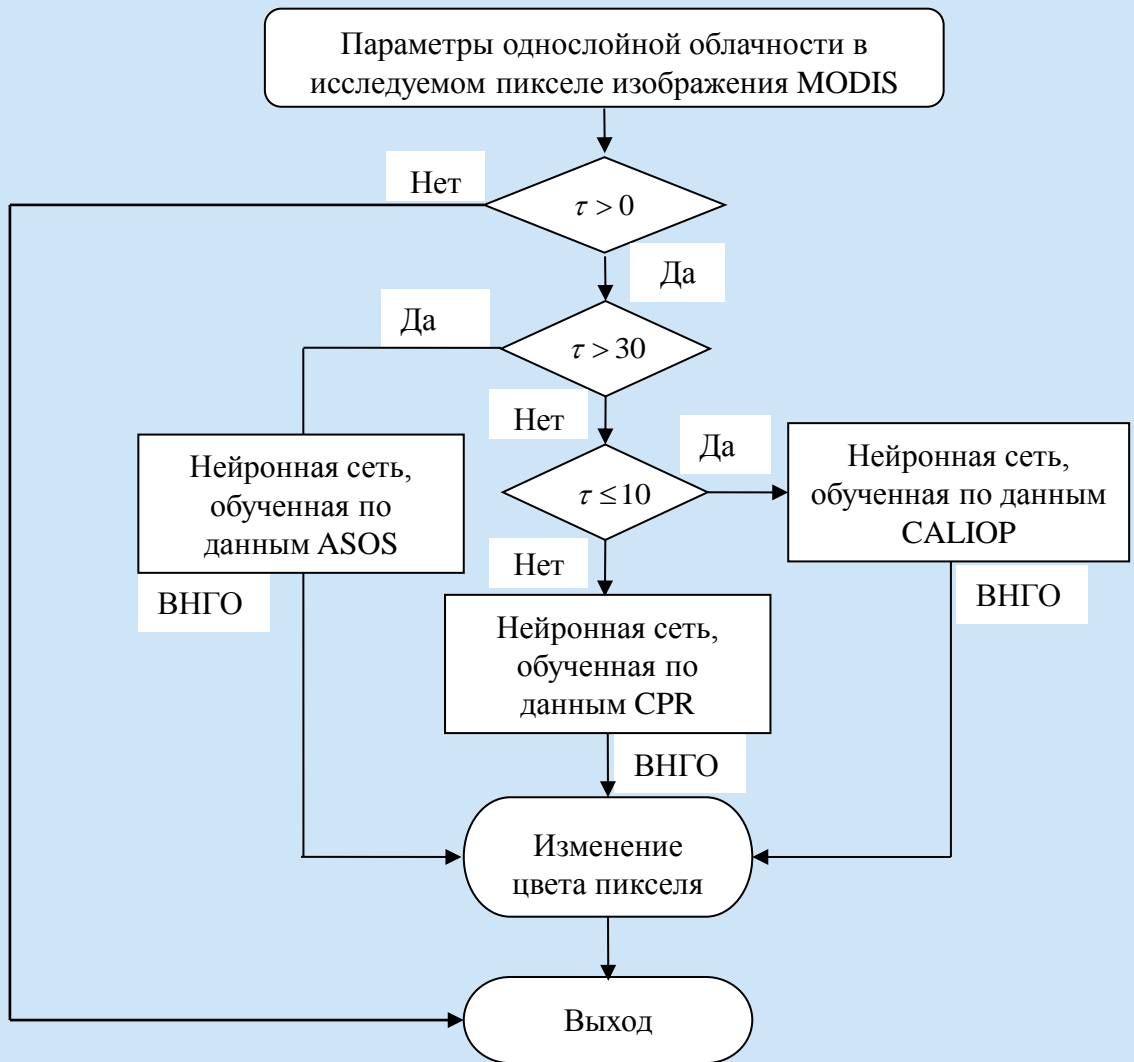
Интерпретатор



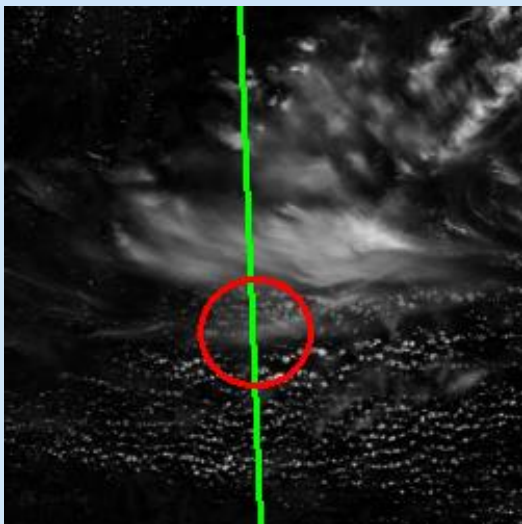
ВНГО
(активное зондирование)

Текущее состояние проблемы:

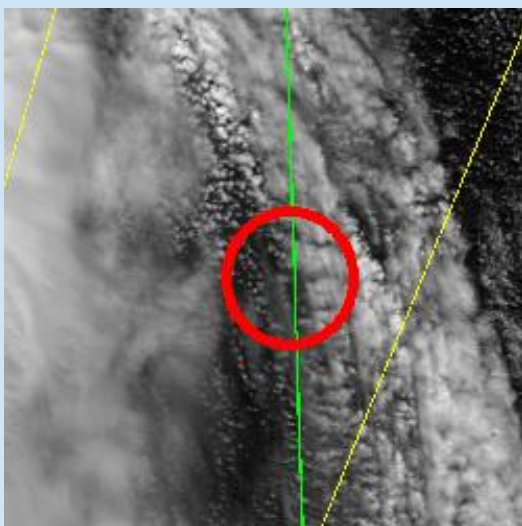
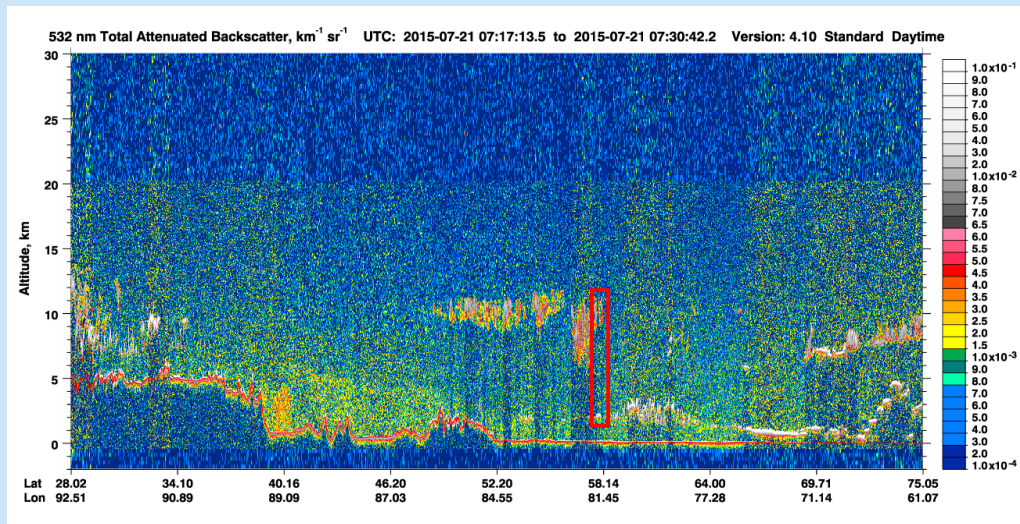
- Оценка смещения -0.2 км при среднеквадратическом отклонении 1.2 км относительно данных ASOS/CALIOP/CPR
- Однослойная облачность (многослойная облачность только при расстоянии между слоями менее 1 км)
- Оптическая толщина любая (рассматривались конвективные и слоисто-дождевые облака над сушей)



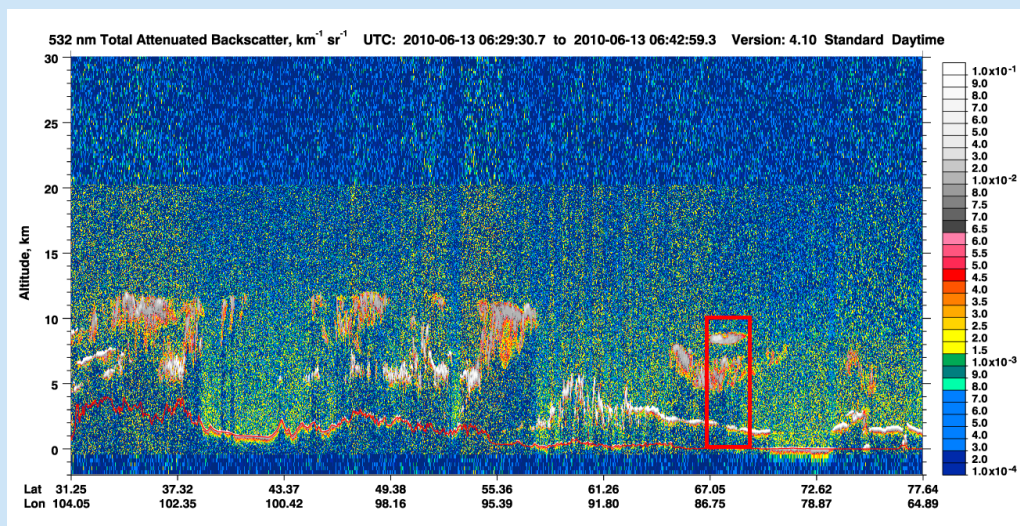
Характеристики многослойной облачности



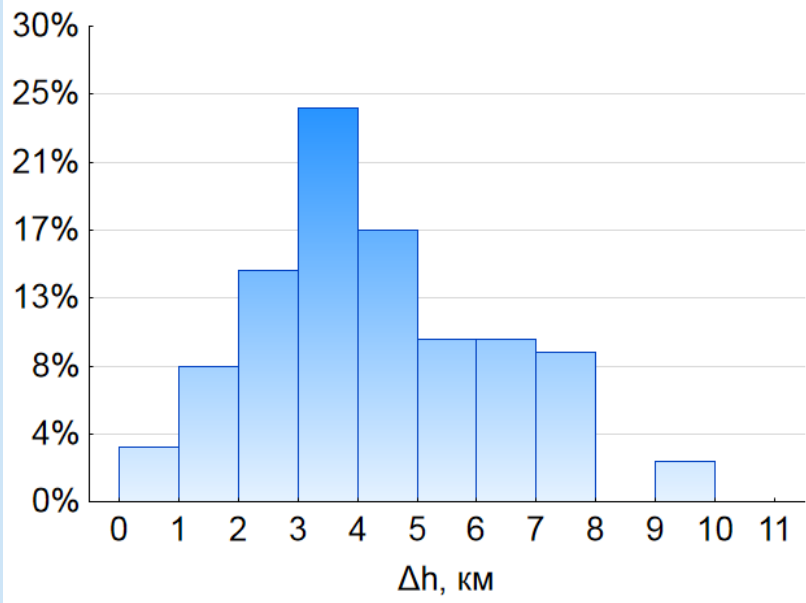
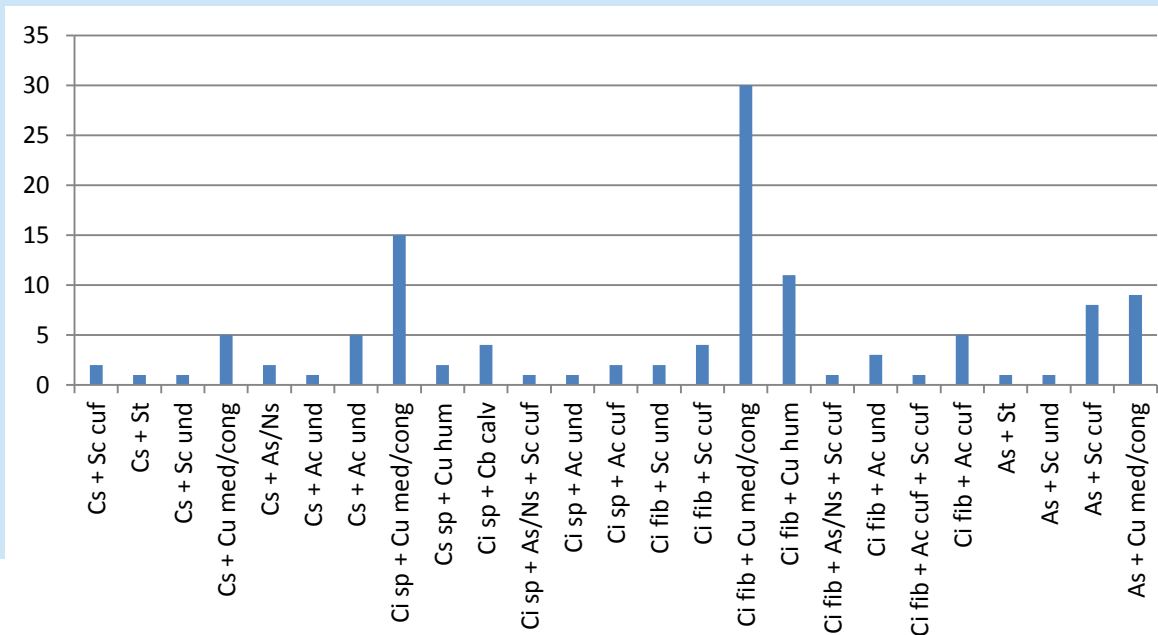
Результат наблюдения двухслойной облачности (перистые нитевидные над кучевыми плоскими) по синхронным данным лидара CALIOP и спектрорадиометра MODIS



Результат наблюдения трехслойной облачности (перистые нитевидные над высококучевыми и слоисто-кучевыми) по синхронным данным лидара CALIOP и спектрорадиометра MODIS

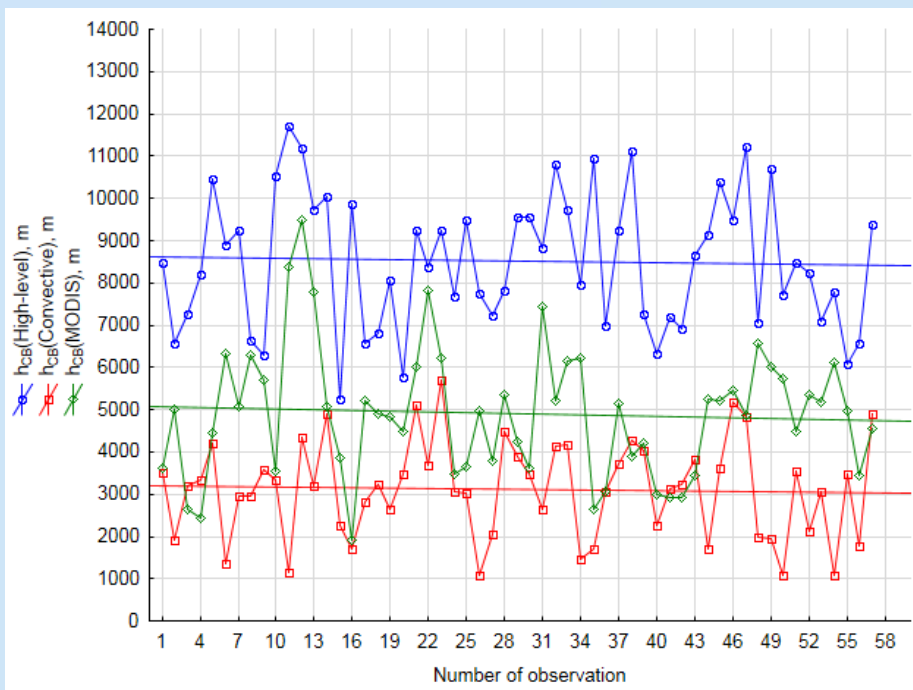


Характеристики многослойной облачности



Расстояние между ярусами облаков

Повторяемость сочетаний облаков



Результаты восстановления ВНГО двухслойной облачности, состоящей из облаков верхнего яруса над конвективными, по данным радиометра MODIS и лидара CALIOP

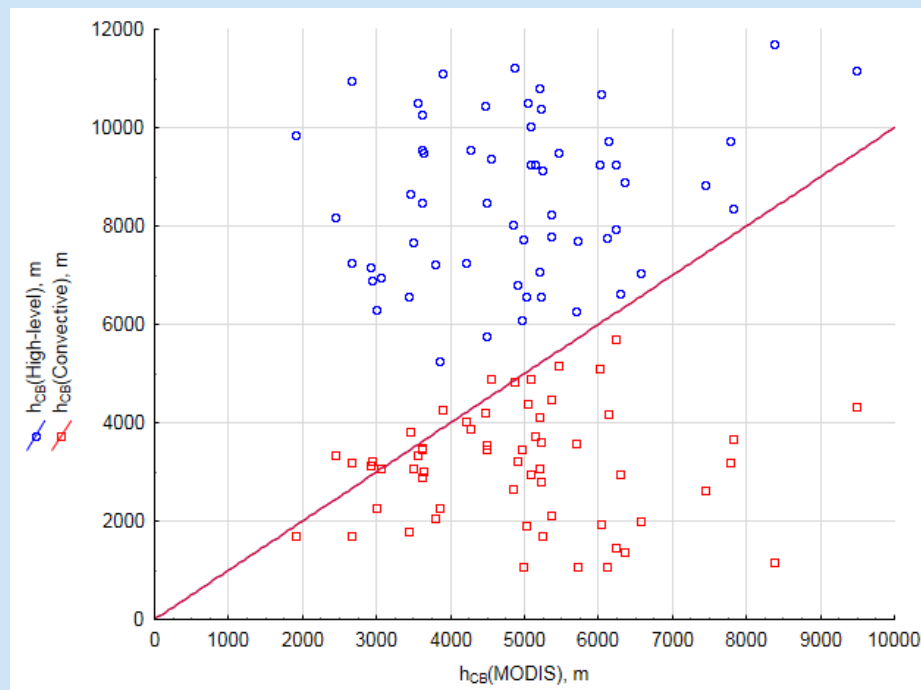
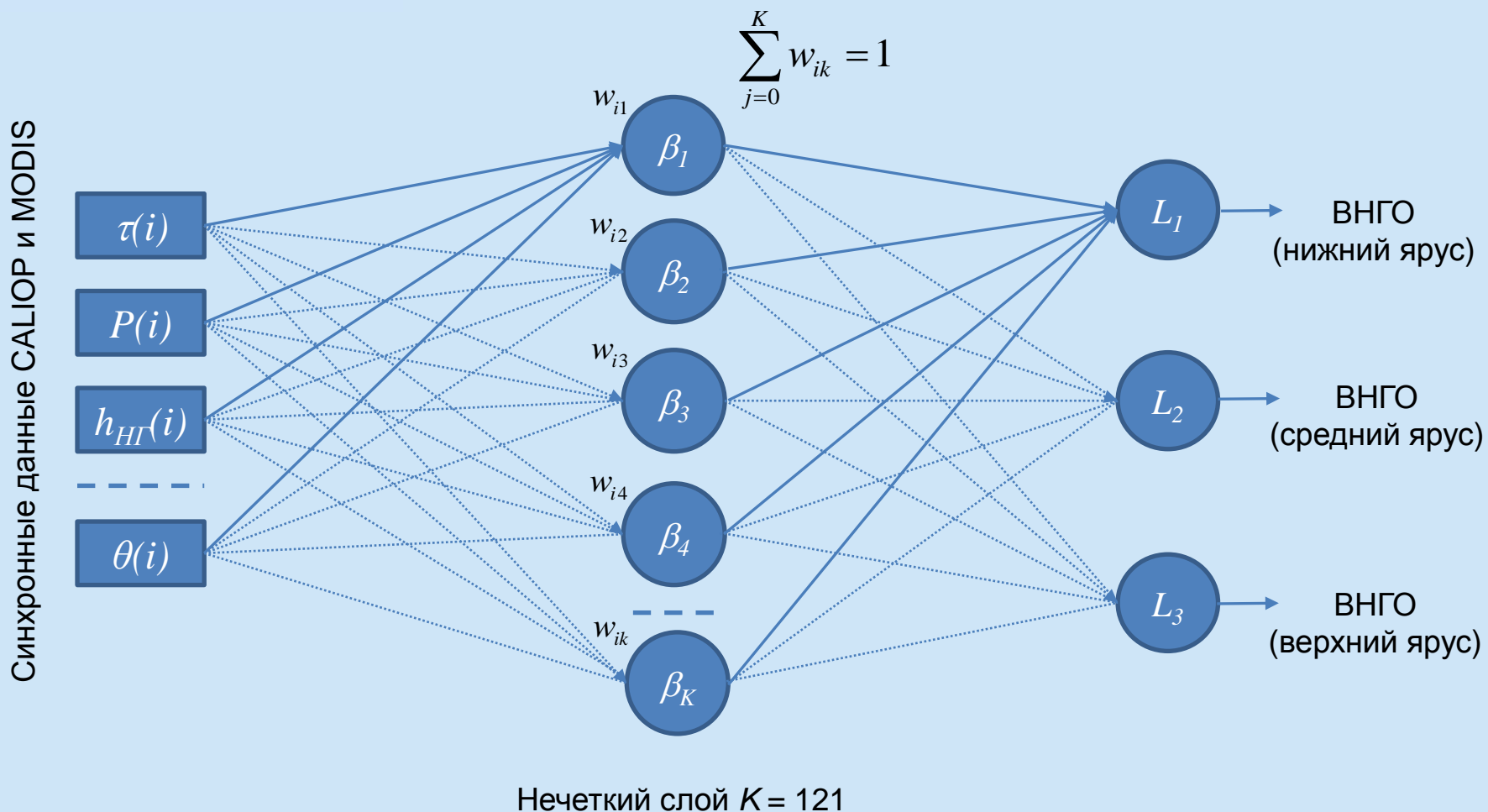


Диаграмма рассеяния восстановленных по данным MODIS и эталонных значений ВНГО двухслойной облачности (облака верхнего яруса над конвективными)

Выводы:

- Алгоритм завышает значения ВНГО относительно нижележащего яруса облачности и занижает для вышележащего;
- При восстановлении ВНГО алгоритм больше опирается на значения оптической толщины, эффективного радиуса частиц и водозапаса, а не характеристик верхней границы.

Алгоритм восстановления ВНГО (многослойная облачность)



β – центры кластеров (диапазон ВНГО с шагом 0.05 км)

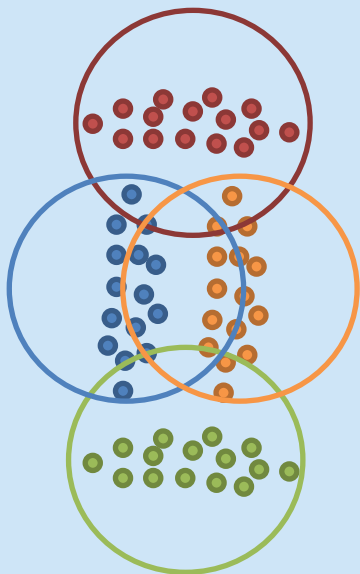
\mathbf{W} – матрица нечеткого разбиения (степени принадлежности)

Алгоритм восстановления ВНГО (многослойная облачность)

Fuzzy C-means

При выборе нейрона-победителя используется обычное эвклидово расстояние между исследуемым образцом \mathbf{x} и центром кластера β

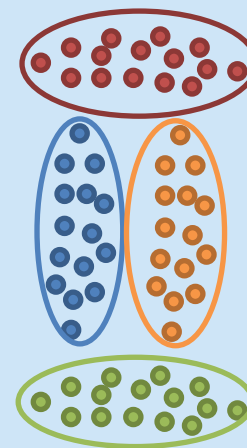
$$d(\mathbf{x}, \beta) = \|\mathbf{x} - \beta\| = \sqrt{(\mathbf{x} - \beta)^T (\mathbf{x} - \beta)}$$



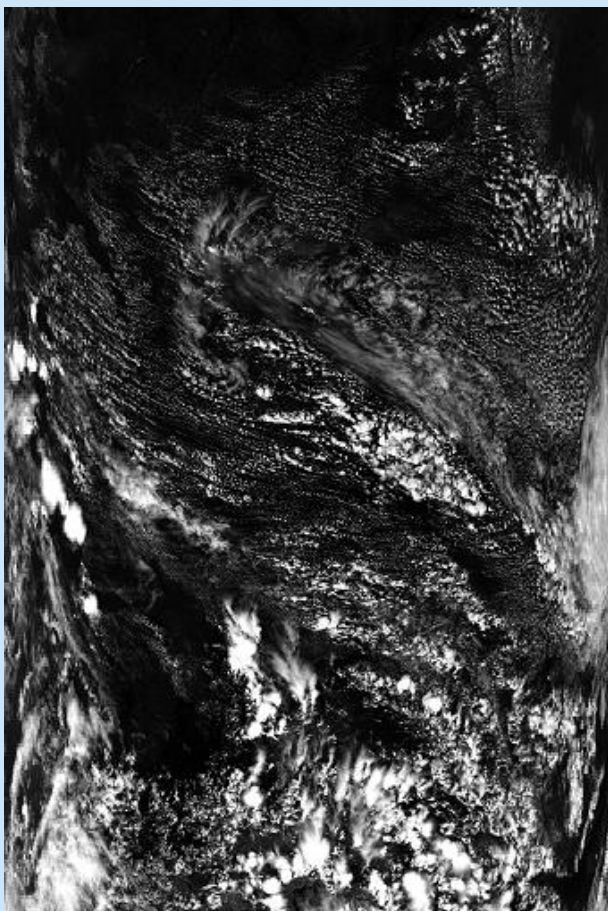
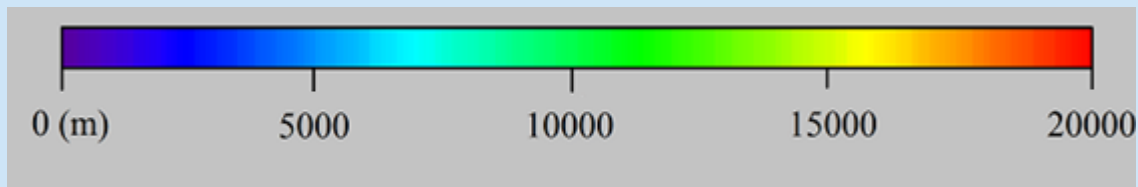
Метод Густафсона-Кесселя

При выборе нейрона-победителя используется модифицированное эвклидово расстояние между исследуемым образцом \mathbf{x} и центром кластера β , где \mathbf{A} – масштабирующая матрица (симметричная и положительно определенная)

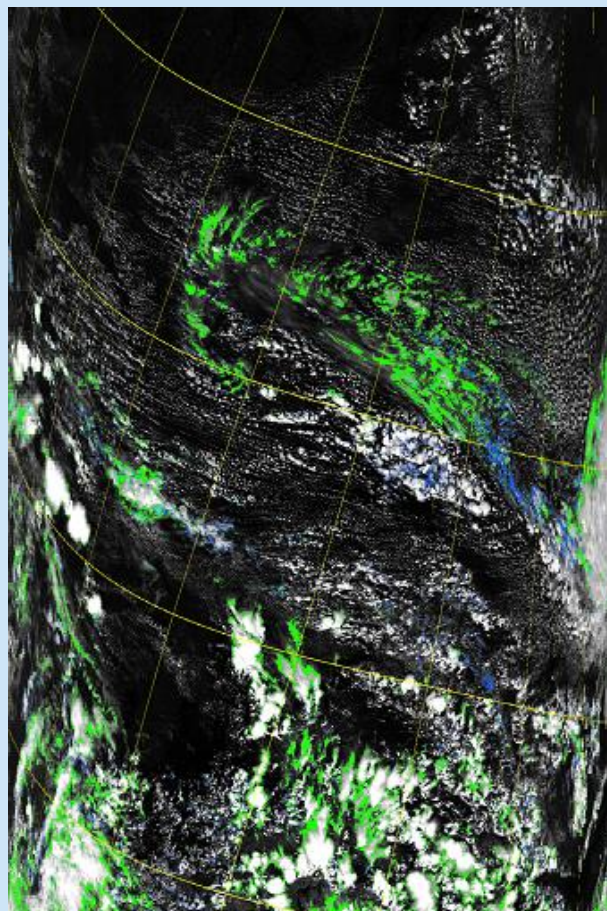
$$d(\mathbf{x}, \beta) = \|\mathbf{x} - \beta\| = \sqrt{(\mathbf{x} - \beta)^T \mathbf{A} (\mathbf{x} - \beta)}$$



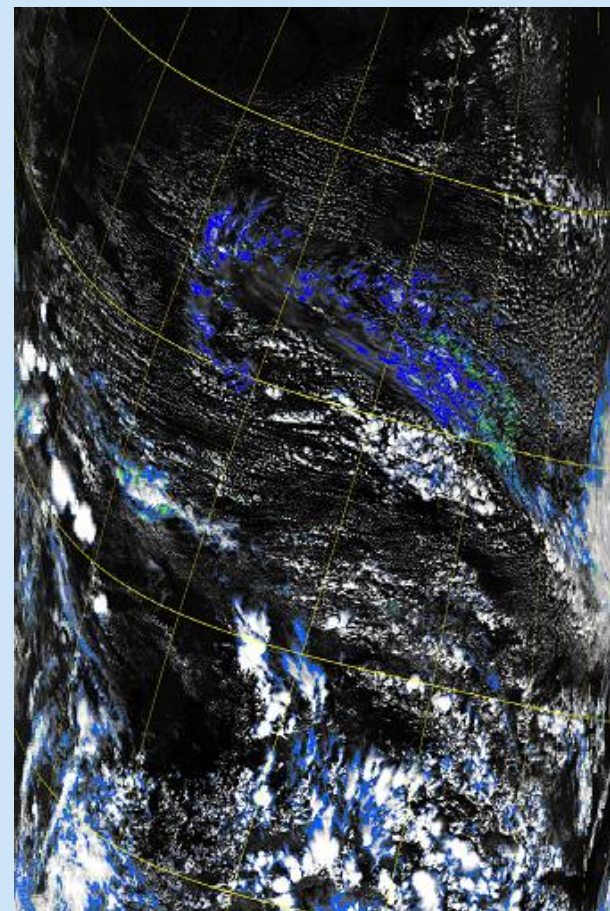
Результаты восстановления ВНГО (многослойная облачность)



Исходное изображение



ВНГО (1 слой)

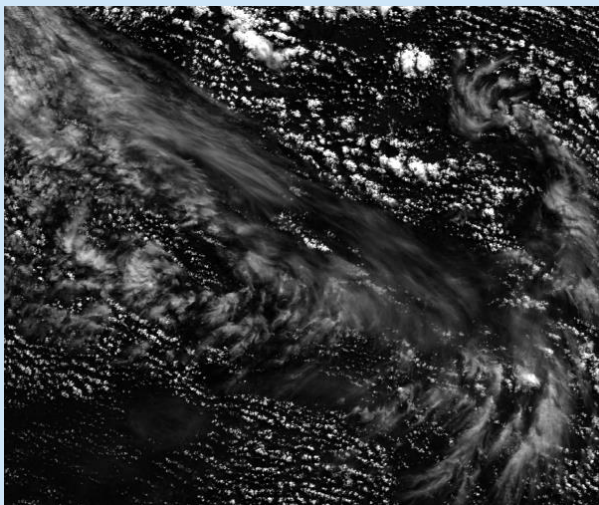


ВНГО (2 слой)

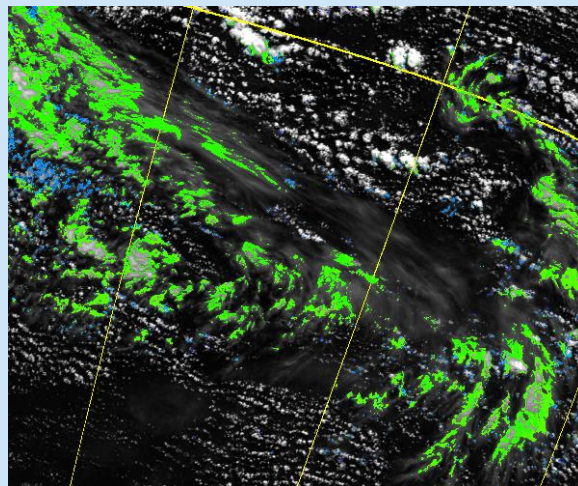
Результаты восстановления ВНГО (многослойная облачность)

Fuzzy C-means

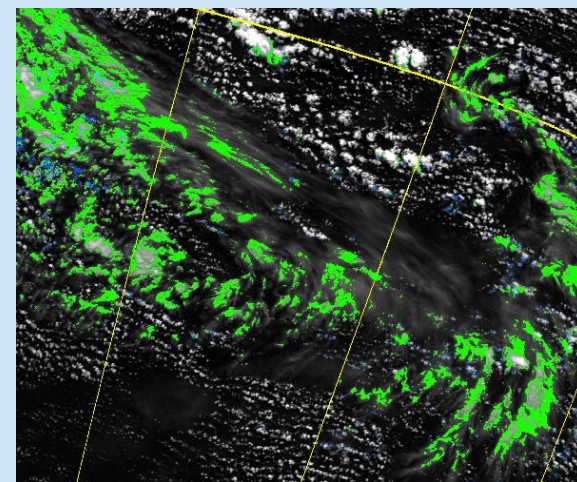
Метод Густафсона-Кесселя



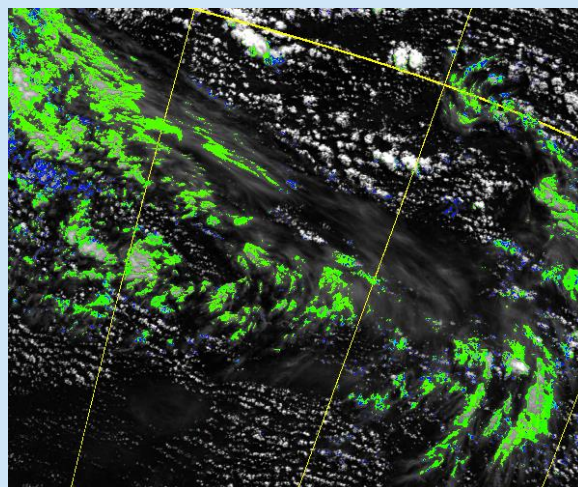
Исходное изображение
(перистые облака над
кучевыми)



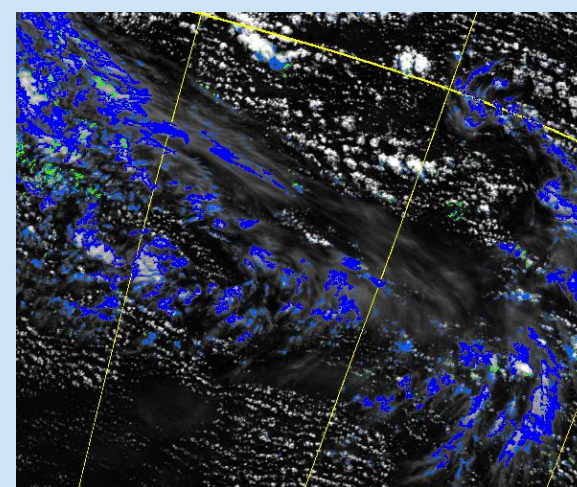
1 слой



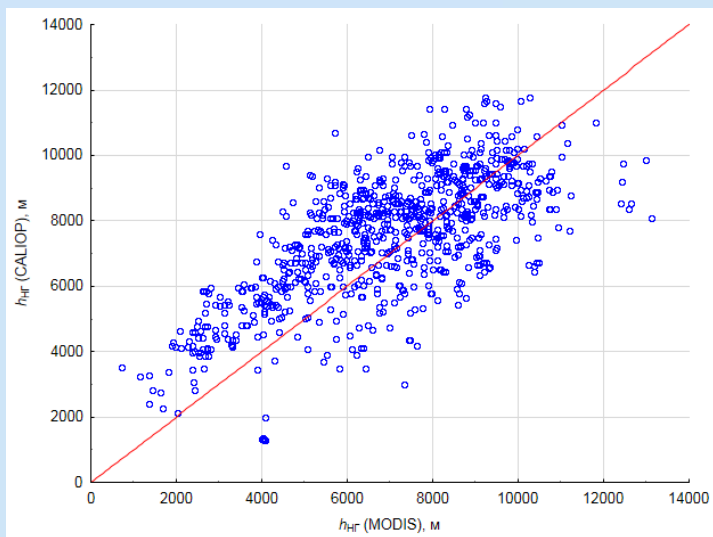
1 слой



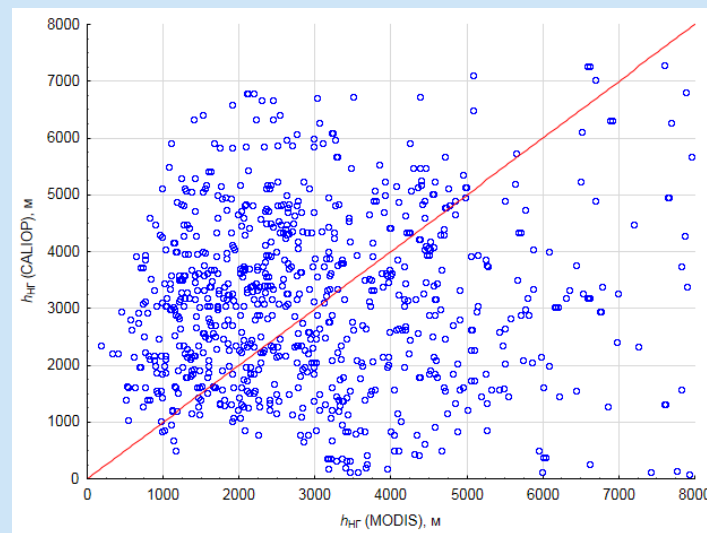
2 слой



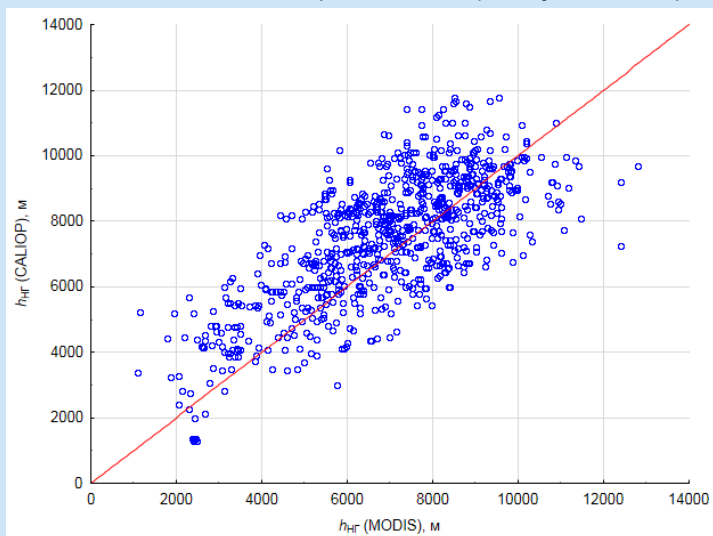
2 слой



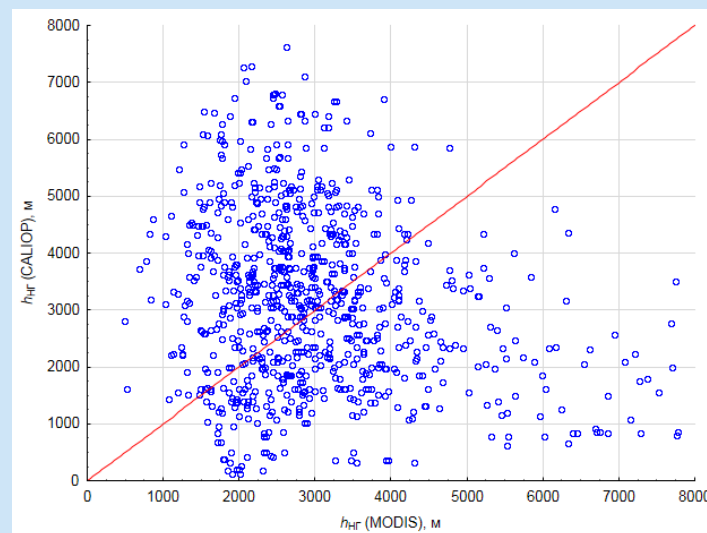
Восстановленные по данным MODIS и эталонные по данным CALIOP значения ВНГО для верхнего слоя (**Fuzzy C-means**)



Восстановленные по данным MODIS и эталонные по данным CALIOP значения ВНГО для нижнего слоя (**Fuzzy C-means**)



Восстановленные по данным MODIS и эталонные по данным CALIOP значения ВНГО для верхнего слоя (**Метод Густафсона-Кесселя**)



Восстановленные по данным MODIS и эталонные по данным CALIOP значения ВНГО для нижнего слоя (**Метод Густафсона-Кесселя**)

Слой	n	$\langle \Delta \rangle$, км	σ_{Δ} , км	δ_{σ}	R_{Δ}^2
Fuzzy C-means					
Верхний	2622	-0.6	1.7	0.23	0.50
Нижний		0.1	2.5	0.79	0.16
Метод Густафсона-Кесселя					
Верхний	2622	-0.5	1.5	0.20	0.53
Нижний		-0.1	2.1	0.65	0.28

$$\langle \Delta \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((\hat{h}_{CB})_i - (h_{CB})_i \right) \quad \text{– средняя ошибка смещения восстановленных данных от эталонных}$$

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left((\hat{h}_{CB})_i - (h_{CB})_i \right)^2}{n}} \quad \text{– среднеквадратичная ошибка}$$

$$\delta_{\sigma} = \sigma_{\Delta} / \bar{h}_{CB} \quad \text{– относительная среднеквадратичная ошибка}$$

$$R_{\Delta}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left((h_{CB})_i - (\hat{h}_{CB})_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n \left((h_{CB})_i - (\bar{h}_{CB}) \right)^2} \quad \text{– коэффициент детерминации}$$

где n – число наблюдений, h_{CB} – восстановленное значение ВНГО, \hat{h}_{CB} – эталонное значение ВНГО, а \bar{h}_{CB} – эталонное среднее

Основные результаты

- 1) Предложен алгоритм восстановления ВНГО многослойной облачности по данным пассивного спутникового зондирования на основе применения технологии искусственных нейронных сетей и методов нечеткой логики;
- 2) Проведено сравнение двух способов задания нечеткого слоя в используемой нейронной сети: Fuzzy C-means и метод Густафсона-Кесселя;
- 3) Алгоритм позволяет давать несколько вариантов ответов относительно значения ВНГО многослойной облачности, но с различной степенью принадлежности;
- 4) В настоящее время алгоритм позволяет восстанавливать ВНГО многослойной облачности с $\tau \leq 10$ с оценками среднего смещения относительно эталонных значений CALIOP -0.5 км для первого слоя и -0.1 км при среднеквадратических отклонениях 1.5 и 2.1 км соответственно;
- 5) Перспективным направлением развития является привлечение данных радара CPR (спутник CloudSat) для обеспечения возможности определять ВНГО у многослойной облачности для $10 < \tau \leq 25$

Скороходов Алексей Викторович vazime@yandex.ru, тел. +7 923 401 60 70

Курьянович Ксения Викторовна ksuyain@mail.ru

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