

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОТ ОБЛАКОВ ВЕРХНЕГО ЯРУСА И ВЕРОЯТНОСТИ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ЛИДАРНОГО И СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Акимов И.М., Кучинская О.И., Пустовалов К.Н., Пензин М.С., Романов Д.А., Самохвалов И.В.,
Брюханов И.Д., Животенюк И.В., Ни Е.В.

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия
ima8908@mail.ru, olesia.kuchinskaia@cern.ch, const.pv@yandex.ru, penzin.maksim@gmail.com, denrom@internet.ru,
lidar@mail.tsu.ru, plyton@mail.tsu.ru, wolf.ni@yandex.ru

В работе представлены результаты идентификации облаков верхнего яруса (ОВЯ), на основе анализа данных наземного лидарного зондирования атмосферы и реанализа MERRA2. Были изучены распределения высот верхней и нижней границы ОВЯ в рамках серий экспериментов, проводимых с 2009 года по настоящее время. Полученные данные сопоставлены с характеристиками распределения параметра «Cloud», который отражает вероятность наличия облаков на определенной высоте, рассчитанными по данным спутникового реанализа MERRA2. Сравнение двух источников информации было выполнено с учетом времени и места проведения лидарного эксперимента. Анализ результатов показал хорошую степень согласия в идентификации ОВЯ из двух независимых источников. Это открывает новые возможности для расширения базы данных атмосферных параметров и дальнейшей разработки алгоритмов предсказания высоты формирования ОВЯ с использованием методов машинного обучения.

В последние годы наблюдается растущий интерес к проблемам изменения климата. Одной из важнейших задач, решение которой необходимо для углубления понимания климатических изменений, является точная оценка радиационного баланса Земли. ОВЯ имеют высокое альбедо, что позволяет им эффективно отражать коротковолновое солнечное излучение, тем самым уменьшая количество солнечной энергии, достигающей поверхности планеты. В то же время, длинноволновое излучение, исходящее от земли и приземного воздуха, ОВЯ задерживают и переизлучают обратно. Исследование свойств и динамики ОВЯ, включая их формирование и взаимодействие с потоками радиационной энергии в атмосфере, является важным аспектом для разработки и проверки различных климатических моделей [1,2].

Настоящее исследование направлено на сравнительный анализ высот ОВЯ и вероятности их формирования. Для этого рассматриваются данные поляризационного лазерного зондирования ОВЯ [3] в сочетании с данными реанализов ERA5 [4] и MERRA-2 [5] и стандартными наблюдениями за облачностью и атмосферными явлениями, проводимыми на метеорологических станциях [6]. Данные источники информации о параметрах атмосферы применяются для прогнозирования формирования ОВЯ и их характеристик, включая перистые

облака с преимущественной горизонтальной ориентацией кристаллических ледяных частиц. Интеграция больших массивов экспериментальных данных параметров атмосферы совместно с анализом и обработкой данных методами машинного обучения позволяет выявить закономерности в формировании и эволюции ОВЯ, улучшить качество данных, решить задачи классификации структуры и формы облаков, а также отслеживать изменения в облаках с течением времени.

В данной работе представлены результаты идентификации ОВЯ на основе данных наземного лидарного зондирования атмосферы и реанализа MERRA2. Анализировались распределения верхней и нижней границ ОВЯ в рамках серии экспериментов лидарного зондирования атмосферы, проводимых на высотном матричном поляризационном лидаре (ВМПЛ) Национального исследовательского Томского государственного университета (НИ ТГУ) с 2009 года по настоящее время [3]. Исследованы данные, представленные в реанализе MERRA-2, на основе которых были отобраны параметры для дальнейшего анализа: величина «Cloud», указывающая на вероятность наличия облака на определенной высоте, а также параметры «QI» и «QL», представляющие массовые доли льда и воды на заданной высоте соответственно. На рисунке 1 представлены нормированные относительно параметра «Cloud» интерполированные распределения указанных величин. Красная пунктирная линия обозначает границы, определенные с помощью лидарного зондирования.

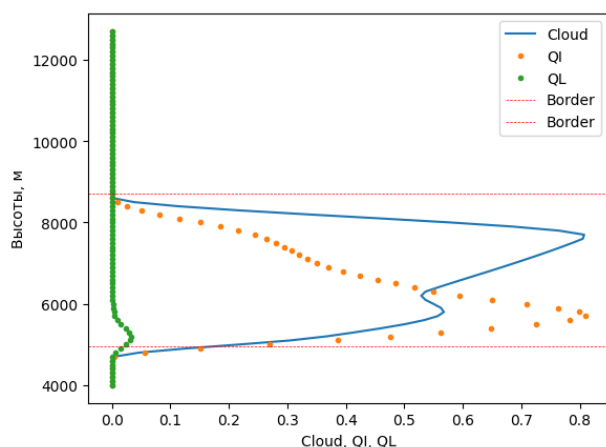


Рисунок 1 – Профили нормированных значений распределений параметров ОВЯ в конкретный момент времени

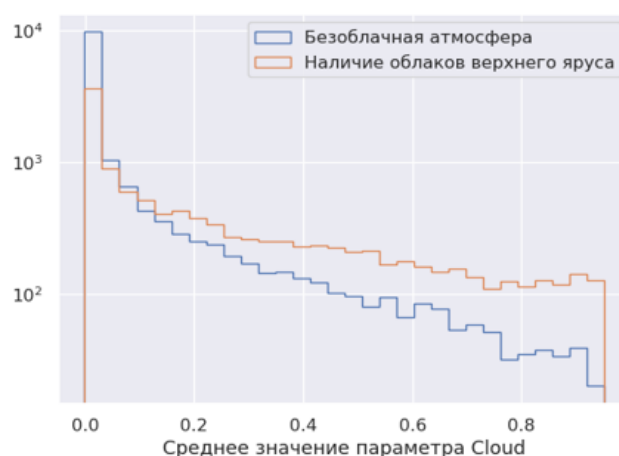


Рисунок 2 – Гистограммы распределений среднего значения «Cloud» для двух выборок

На основе полученных данных были сформулированы две основные задачи: определить, наблюдалось ли облако в конкретный момент времени с использованием представленных параметров, и установить высоты верхней и нижней границ ОВЯ на основе этих параметров.

Для решения первой задачи был предложен следующий подход: рассчитать среднее значение величины «Cloud» на высотах формирования ОВЯ (6–10 км) и, выбрав

соответствующий разделяющий дискриминант, определить, превышает ли текущее значение среднего уровня, что будет свидетельствовать о наличии облака. Для решения этой задачи использовались данные стандартных метеорологических наблюдений на метеостанции «Томск» (29430), полученные с сервера Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации [6]. На рисунке 2 представлена гистограмма распределений средних величин параметра «Cloud» для двух типов наблюдений. Рисунки 3 и 4 иллюстрируют ошибки для двух разделяющих значений — 0,01 и 0,2 соответственно. Как видно, с помощью предложенных методов удастся минимизировать либо ошибку первого рода, либо ошибку второго рода. Ошибка первого рода (α) возникает, когда нулевая гипотеза (в данном случае — отсутствие облаков) отвергается, хотя на самом деле она верна. Это означает, что мы ошибочно определяем наличие облаков, когда их нет. Ошибка второго рода (β) происходит, когда нулевая гипотеза не отвергается, хотя она ложна. В нашем контексте это означает, что мы не обнаруживаем облако, когда оно действительно присутствует.

В ходе проведенного исследования не удалось найти оптимальный способ разделения, который бы одновременно минимизировал обе ошибки. Поэтому для дальнейших исследований необходимо определить, какая из ошибок является приоритетной для минимизации.

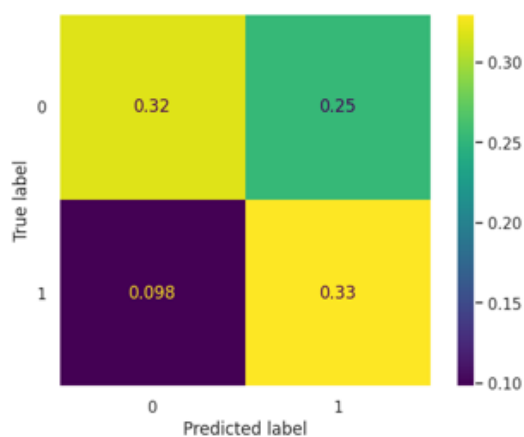


Рисунок 3 – Матрица ошибок, полученная после применения разделения с помощью дискриминанта 0,01

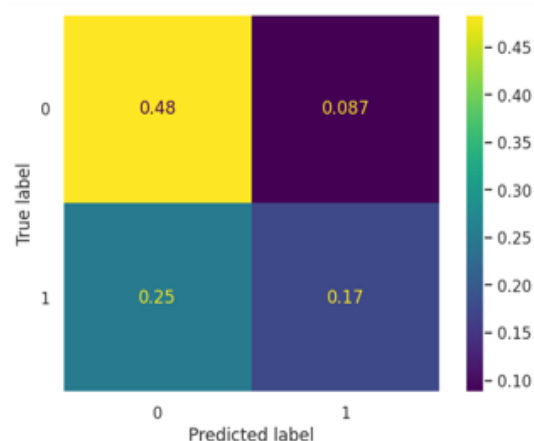


Рисунок 4 – Матрица ошибок, полученная после применения разделения с помощью дискриминанта 0,2

Для решения второй задачи были реализованы два различных подхода к определению нижней границы облака. В первом подходе ищутся особые точки - нули второй производной распределения массовой доли льда в атмосфере вблизи точек максимума данного распределения. Далее в качестве ответа выбирается ближайшая слева особая точка к нижнему максимуму (рисунок 5). Второй подход предполагает движение от нижнего пика в сторону

уменьшения высот до тех пор, пока значение массовой доли льда не опустится ниже заданного порогового значения (рисунок 6). В обоих случаях пиковые значения определялись как нули первой производной.

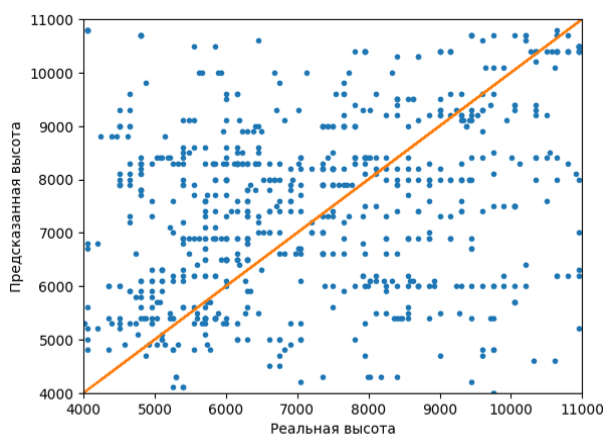


Рисунок 5 – Точечная диаграмма
предсказания высот для первого способа

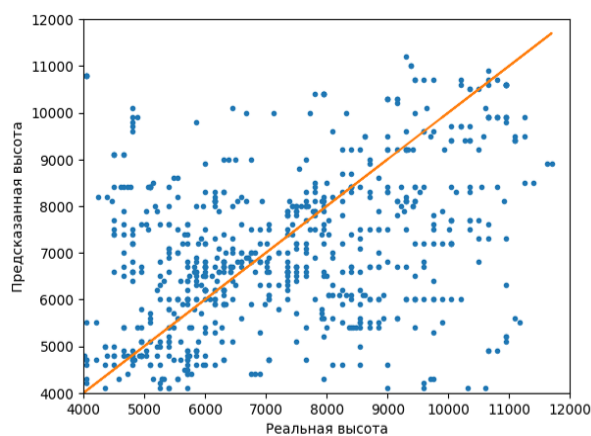


Рисунок 6 – Точечная диаграмма
предсказания высот для второго способа

При решении задачи выявления дней с ОВЯ необходимо определить приоритетные критерии: важнее ли для нас установить отсутствие облаков с высокой степенью уверенности или подтвердить их наличие. Этот выбор будет определять методологию фильтрации данных и подходы к анализу. Оба предложенных в данной работе метода для решения задачи предсказания нижней границы ОВЯ продемонстрировали неудовлетворительные результаты. В связи с этим необходимо продолжить поиск более эффективного алгоритма для решения данной задачи.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Грант № 24-72-10127.

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). "Climate Change 2021: The Physical Science Basis." Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. DOI: 10.1017/9781009157896.

2. Kiehl, J.T., & Trenberth, K.E. "Earth's annual global mean energy budget." Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 78, no. 2, 1997, pp. 197-208. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2.

3. Высотный поляризационный лидар для зондирования атмосферы и Томская ионосферная станция «ЛИДАР-ИОНОЗОНД». URL: <https://ckp-rf.ru/usu/73573> (дата обращения: 21.02.2025 г.).

4. Электронный ресурс URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (Copernicus Climate Data Store).

5. NASA, GMAO. URL: <https://goldsmr5.gesdisc.eosdis.nasa.gov/opendap/hyrax/MERRA2/> (дата обращения 10.02.2025).

6. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549 от 10 апреля 2014 г.