

ВАЛИДАЦИЯ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ В РЕАНАЛИЗЕ ERA-5 ПО ПОКАЗАНИЯМ СУДОВОГО ЛИДАРА

М. А. Борисов^{1,2}, М. А. Криницкий^{1,2}, Е. А. Ежова^{1,2}, Н. Д. Тилинина¹

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;*

² *Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет),
Россия, 141701, Долгопрудный, Институтский пер., д. 9,
e-mail: borisov.ma@phystech.su*

Высота нижней границы облачности (ВНГО) является ключевым параметром, участвующим в механизмах регулирования радиационного бюджета климатической системы Земли, влияющим на локальные температурные условия и на авиационную безопасность. В некоторых случаях ВНГО может служить оценкой толщины планетарного пограничного слоя. Точная модельная оценка ВНГО важна для метеорологических прогнозов и понимания климатологических характеристик атмосферы и их тенденций.

В настоящей статье приводятся результаты валидации высоты нижней границы облачности (ВНГО), полученной из реанализа ERA5, с использованием высокоточных данных, собранных с применением судового лидара научно-экспедиционного судна «Академик Федоров» в рамках 69-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ-69). Для валидации модельные оценки ВНГО реанализа ERA5, представленные в пространственном разрешении $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ и временном разрешении 1 час, сравниваются с данными лидара, показания которого получены в режиме мониторинговых измерений с периодом 1 минута.

Результаты анализа показали, что данные ERA5 имеют систематическое отклонение от инструментальных измерений, что подтверждается выборочной оценкой среднего смещения и стандартного отклонения ошибок модельной оценки ВНГО. К аналогичному выводу можно прийти, рассматривая квантиль-квантиль диаграмму значений ВНГО в модельных оценках ERA5 и в данных лидарных измерений. Анализ карты ошибок ERA5 показывает их неравномерное пространственное распределение и существенную зональную зависимость.

Результаты работы могут быть использованы для дальнейших исследований в области метеорологии и климатологии, а также для совершенствования методов моделирования высоты нижней границы облачности.

Ключевые слова: высота нижней границы облачности, ERA5, судового лидар, валидация, метеорология, облачность, Cloud Base Height

Введение

Атмосферные процессы, связанные с образованием облаков, оказывают значительное влияние на климатические условия и авиационную безопасность. Одним из ключевых параметров облачности, определяющих свойства облаков и их влияние на радиационный баланс, является высота нижней границы облачности (ВНГО)

(Krinitskiy, 2023). Важность данного параметра обусловлена тем, что он не только влияет на эффективность метеорологических прогнозов, но и играет критическую роль в понимании динамики атмосферы. Кроме того, ВНГО влияет на условия взлета и посадки самолетов и учитывается при формировании маршрутов авиасудов. На сегодняшний день существует несколько широко используемых способов оценки ВНГО:

- лидарный (Pal, Steinbrecht, Carswell, 1992);
- запуск метеозондов (Rosenfeld, 2006);
- визуальный метод, в рамках которого экспертно определяется тип облаков, в результате чего оценивается ВНГО за счет высот, характерных для каждого типа облаков (Borisov, Krinitskiy, 2022);
- модельная оценка ВНГО с применением параметризаций подсеточных процессов (Showalter, 1971; Zuev, Krasnenko, 2009);
- применение оптических свойств фотографий небосвода (Borisov, Krinitskiy, Tilinina, 2023).

В условиях недостаточной плотности сети метеорологических станций и отсутствия регулярных радиозондовых измерений, данные атмосферного реанализа, такие как ERA5, становятся важным инструментом для оценки ВНГО.

Реанализ ERA5 (Hersbach, et al., 2020) предоставляет высококачественные данные с пространственной разрешающей способностью $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ и временным шагом в 1 час, что позволяет отслеживать различные атмосферные явления и параметры, включая высоту нижней границы облачности. Однако, несмотря на свои преимущества, ERA5 имеет ограничения в точности определения ВНГО, вызванные недостаточной плотностью метеостанций и особенностями моделей, используемых для расчетов. Это делает необходимым проведение валидации данных ERA5 с использованием высокоточных измерений, полученных с помощью лидара.

На основе почасовых вертикальных профилей атмосферы ERA5 за период с 2008 по 2019 гг. был разработан новый алгоритм (RHs-CCL) (Wang et al., 2022) для оценки ВНГО. Этот подход особенно актуален в условиях, когда низкие облака могут существенно повлиять на безопасность полетов в юго-западном Китае, где параметры облаков, такие как ВНГО, часто не имеют точных прогнозов. Данный подход использует метод пороговой влажности (RHs) для определения возможных высот облаков, а затем проверяет, соответствует ли высота уровню конвективной конденсации (CCL), что позволяет оценить ВНГО, особенно в условиях, когда облака образуются за счет конвекции. Для оценки производительности RHs-CCL результаты сравниваются с наземными наблюдениями и данными ERA5 о ВНГО. Результаты показали, что коэффициент корреляции между RHs-CCL и наблюдениями в среднем достигает 0.5, а ошибка RHs-CCL меньше, чем у существующих алгоритмов, с минимальными значениями средней абсолютной ошибки и среднеквадратичной ошибки на четырех исследуемых аэропортах, составляющими 243 м и 321 м соответственно. При этом ошибки определения ВНГО в реанализе ERA5 оказались наибольшими по сравнению с прочими методами.

В другом исследовании (Moraru et al., 2022) был проведен сравнительный анализ данных о высоте облаков на территории Западной Сибири на основе данных реанализа ERA5 и визуальных наблюдений на метеорологических станциях за период с 2000 по 2020 гг. В рамках исследования была оценена изменчивость высоты нижней границы облачности. В результате выяснилось, что пространственное распределение значений ВНГО, полученных из наблюдений, в целом схоже во все сезоны: высота увеличивается с севера на юг региона. Однако результаты временной изменчивости оказались противоречивыми, что подчеркивает необходимость использования различных баз данных и учета дополнительных метеорологических параметров для более точных оценок высоты нижней границы облаков.

В статье (Li et al., 2024) авторы провели валидацию высоты нижней границы облачности (ВНГО), полученной из реанализа ERA5, на основании спутниковых наблюдений с использованием данных CloudSat и CALIPSO за период с 2006 по 2019 гг. Для оценки точности ВНГО из ERA5 авторы применили метод сопоставления данных по времени и пространству, что позволило выделить значительное число образцов для анализа. Результаты показали, что ВНГО, полученные из ERA5, в целом занижают реальные значения, особенно в низких широтах, где среднеквадратичная ошибка (RMSE) достигала 4218 м.

Авторы также применили методы машинного обучения для коррекции значений ВНГО, включая линейную регрессию, наивный байесовский классификатор и алгоритм случайного леса. Из всех методов наилучшие результаты показал случайный лес, который снизил RMSE до 2557 м и улучшил распределение оценок ВНГО в реанализе, приближая его к распределению спутниковых наблюдений. Это подтвердило необходимость применения дополнительных методов коррекции ВНГО в реанализе ERA5.

В статье Kundu A. et al. (2023) авторы провели валидацию высоты нижней границы облачности (ВНГО), полученной из реанализа ERA5, с использованием данных, собранных с помощью наземного LIDAR-целиометра (облакомера) в Умиаме, расположенном на Шиллонгском плато. Исследование охватывало период с февраля 2019 г. по январь 2022 г. и показало, что ВНГО варьируется в зависимости от сезона, с более высокими значениями в предмуссонные месяцы и более низкими во время муссонов и постмуссонов. Сравнение ВНГО из реанализа с данными целиометра показало, что ERA5 не всегда точно определяет высоту облаков, что связано ее неспособностью учитывать мелкомасштабные процессы, влияющие на образование облаков.

Таким образом, данные исследования подчеркивают важность разработки новых алгоритмов для оценки ВНГО а также валидации модельного значения ВНГО в атмосферном реанализе ERA5. Судовой лидар на борту научно-экспедиционного судна «Академик Федоров» предоставляет возможность получения высокоточных данных о высоте облаков. Это позволило провести сравнительный анализ с данными ERA5 в рамках 69-й Российской антарктической экспедиции. Сравнение этих данных помогло оценить точность расчетов высоты нижней границы облачности в реанализе.

В связи с этим, цель настоящего исследования заключается в валидации параметра высоты нижней границы облачности в реанализе ERA5 на основе данных судового лидара в рамках экспедиции РАЭ-69 на судне «Академик Федоров».

Данные и методы

В настоящем исследовании для определения референсных значений высоты нижней границы облачности (ВНГО) используются данные, полученные с судового лидара «Академик Федоров», а также данные реанализа ERA5 параметра «высота нижней границы облачности» (Cloud Base Height, CBH) за 2023 и 2024 гг. в рамках экспедиции РАЭ-69.

Лазерный измеритель высоты облаков СТ-12К фирмы “Vaisala Oy” является основной частью метеостанции MILOS-520 для оценки ВНГО на НЭС «Академик Федоров». Датчик работает на длине волны 904 нм и обладает высокой точностью измерений, достигающей 15 м. Диапазон определяемых высот от 15 м до 4000 м. Предел допускаемой абсолютной погрешности датчика измеряется формулой $\pm(7.50 + 0.02h)$, где h – измеренная ВНГО. В экспедиции РАЭ-69 период измерений ВНГО равнялся одной минуте. Данные были собраны в период с октября 2023 по апрель 2024 гг. в Атлантическом и Южном океане, что позволило получить данные о ВНГО в различных метеорологических условиях. На основании собранных лидарных данных была построена карта с треком судна, приведенная на рисунке 1.

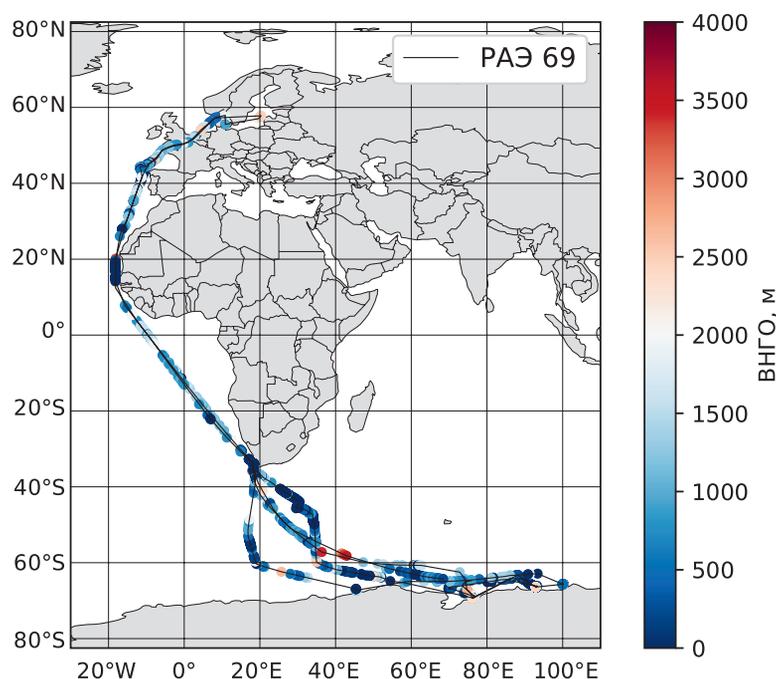


Рис. 1 – Трек НЭС «Академик Федоров» в рамках экспедиции РАЭ-69 (черная сплошная ломаная линия) с отмеченными позициями измерений ВНГО, осуществленных с применением бортового лидара. Цветом точек отображена высота определенной ВНГО в соответствии с используемой цветовой шкалой

На треке точками отмечены результаты лидарных измерений, для каждого из которых цветом показано значение определенной ВНГО. Карта позволяет визуально оценить пространственное распределение ВНГО вдоль траектории движения судна «Академик Федоров» во время экспедиции.

Реанализ ERA5 представляет собой продукт Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), который предоставляет данные с пространственной разрешающей способностью $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ и временным шагом в 1 час. Данные ERA5 охватывают обширный период наблюдений с 1950 г. по настоящее время. Высота нижней границы облачности в реанализе определяется как уровень, на котором концентрация водяного пара достигает 100 %. Алгоритмы расчетов ВНГО учитывают атмосферные условия, включая температуру, влажность и динамику ветра, что позволяет получать более точные данные о высоте облаков. Расчеты ВНГО основаны на физических моделях атмосферной динамики и учитывают различные метеорологические параметры. В рамках валидации значений ВНГО использовались данные ERA5 за аналогичный временной промежуток экспедиции РАЭ-69. Далее в тексте будет использован термин ВНГО с уточнением – измеренный прибором или извлеченный из ERA5.

Гистограмма лидарных измерений ВНГО (рисунок 2) демонстрирует преобладание низких значений высоты нижней границы облачности, с быстрым убыванием частоты при увеличении высоты. Гистограмма ВНГО из ERA5 (рисунок 3) имеет более сложное распределение, с пиками в области низких и высоких значений, что указывает на возможное завышение высоких значений в данных ERA5 по сравнению с лидарными измерениями.

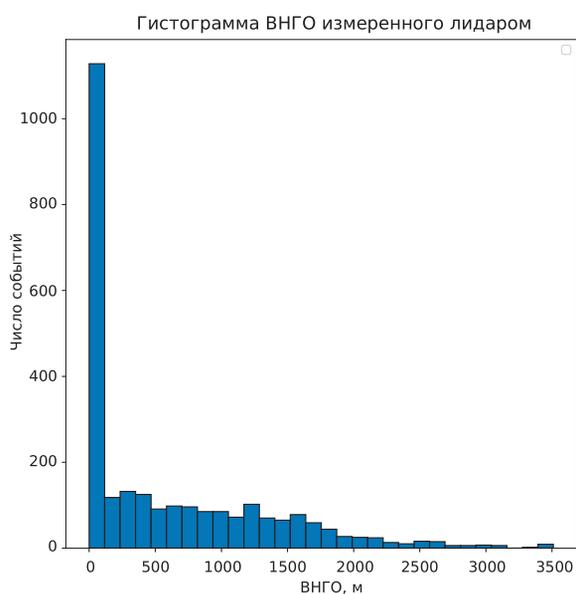


Рис. 2 – Гистограмма измеренных значений ВНГО по пути следования судна «Академик Федоров» в экспедиции РАЭ-69

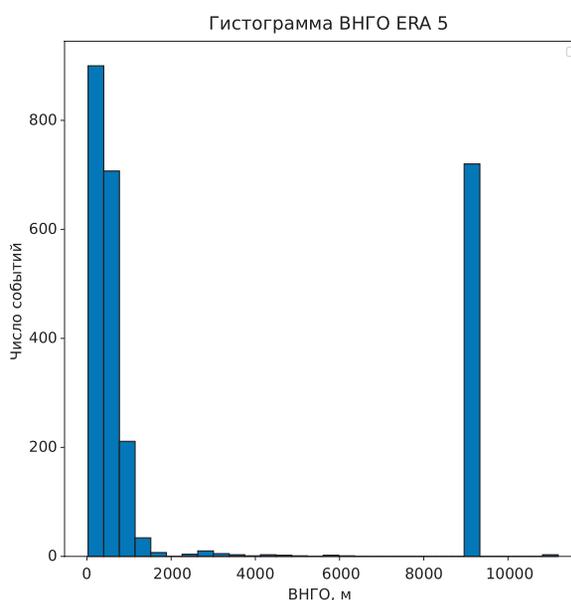


Рис. 3 – Гистограмма ВНГО, извлеченного из атмосферного реанализа ERA5 по пути следования судна «Академик Федоров» в экспедиции РАЭ-69

Для проведения сравнения оценок ВНГО по данным реанализа ERA5 с референсными измерениями судовым лидаром мы провели сопоставление измерений и данных ERA5 в пространстве и во времени. Опорными временными отсчетами для сопоставления данных были приняты временные метки, к которым атрибутированы модельные данные реанализа ERA5, а именно часовые временные метки. Для каждой такой метки мы выбрали показания лидара, для которого отклонение по времени не превышало 10 минут. Таким образом, каждой модельной оценке ВНГО в данных реанализа соответствовал 20-минутный интервал, содержащий измерения ВНГО с применением лидара. При этом измерения лидара сопоставлялись модельной оценке, записанной в ближайшей к положению судна ячейке сетки ERA5.

Следует отметить, что пространственная изменчивость характеристик облачности может влиять на оценку точности воспроизведения ВНГО в реанализе. Для оценки такого влияния мы сравнили характерные размеры ячеек сетки ERA5 с типичной дальностью перемещения судна в рамках обозначенного 20-минутного интервала. Характерная скорость судна «Академик Федоров» составляет 15 узлов (27 км/ч), то есть за 20 минут судно проходит порядка 9 км. При этом в широтном диапазоне позиций судна в рамках экспедиции РАЭ-69 зональный линейный размер ячейки сетки ERA5 меняется в пределах от 10 до 27.75 км, где размер в 10 км достигается лишь в районе антарктического побережья, там скорость судна существенно снижалась для проведения исследований. Таким образом, в подавляющем большинстве случаев НИС «Академик Федоров» за обозначенный 20-минутный интервал не проходил расстояния больше линейного зонального размера ячейки сетки ERA5, что позволяет говорить о пространственно неизменных характеристиках облачности, в частности, ВНГО в данных ERA5 в рамках одного временного отсчета реанализа.

В процессе фильтрации данных мы также удалили точки, в которых ВНГО ERA5 превышает значение 4000 м, поскольку это значение превышает максимальную высоту работы лидарного датчика согласно документации. В рамках исследования сопоставлено 9424 записей, в которых высота нижней границы облачности, измеренная лидарным способом, сопоставляется смоделированному значению высоты нижней границы облачности из атмосферного реанализа ERA5.

Основной характеристикой ошибки модельных оценок ВНГО из реанализа ERA5 в настоящем исследовании принято отклонение такой оценки от референсного значения, полученного по данным лидара, сопоставленного по времени и пространству, как это описано выше в настоящем разделе. Далее проводилась оценка выборочного среднего отклонения (M) и выборочного стандартного отклонения (S) таких ошибок. Для фильтрации аномальных значений отклонения из рассмотрения исключались ошибки, не входящие в интервал значений ($M-3S$; $M+3S$).

Результаты

В рамках настоящего исследования введены три широтных зоны:

- умеренные северные широты, которые находятся севернее 23.5° с. ш.
- экваториальная и тропические зоны, которые лежат между 23.5° с. ш. и 23.5° ю. ш.
- Южные широты и Антарктика южнее 23.5° ю. ш.

Табл. 1 – Статистическое описание ошибки модельной оценки ВНГО в ERA5, по сравнению с лидарными измерениями ВНГО в разных регионах

	Количество точек	Выборочное среднее, м	Выборочное стандартное отклонение, м	R^2
Северные широты севернее 23.5° с. ш. (умеренные северные широты)	1370	-189.58	723.98	-0.56
Экваториальная и тропические зоны южнее 23.5° с. ш. и севернее 23.5° ю. ш.	948	-163.56	771.72	-0.23
Южные широты и Антарктика южнее 23.5° ю. ш.	7106	-73.77	857.79	-0.47
Всего	9424	-99.64	832.40	-0.45

Статистический анализ разности между лидарными измерениями ВНГО и данными ERA5 (см. таблицу 1) по всем 9424 наблюдениям показал выборочное среднее отклонение в -99.64 м, что указывает на незначительное систематическое занижение ВНГО в ERA5. Высокое выборочное стандартное отклонение ошибки модельной оценки ВНГО, по сравнению с лидарными измерениями, равное 832.40 м, свидетельствует о значительной вариабельности модельных значений, используемых в ERA5. Коэффициент детерминации $R^2 = -0.45$ указывает на слабое соответствие между лидарными измерениями и данными ERA5. Раздельный анализ по широтным зонам выявил схожие закономерности, с наиболее выраженным занижением ВНГО в умеренных северных широтах (-189.58 м для зоны севернее 23.5° с. ш.).

Карта на рисунке 4 показывает трек судна «Академик Федоров», проходящий через Атлантический и Южный океаны. Трек отображается черной линией, а цветные точки вдоль трека представляют отклонение измеренного ВНГО от значения параметра СВН в ERA5 в ближайшем по времени и пространству узлу к судну в этот момент времени. Из рисунка 4 видно, что по данным измерений наблюдаются как положительные, так и отрицательные ошибки модельных оценок ВНГО в реанализе ERA5 вдоль всего трека судна. В некоторых районах, например, вдоль западного побережья Африки и в части Южного океана преобладают отрицательные отклонения, тогда как вблизи южной оконечности Африки наблюдаются значительные положительные отклонения.

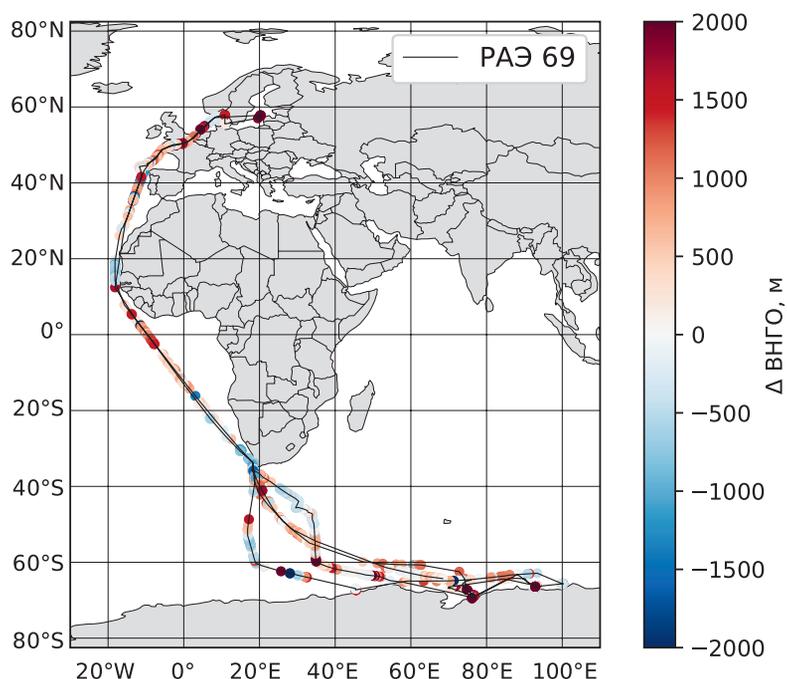


Рис. 4 – Трек НЭС «Академик Федоров» в рамках экспедиции РАЭ-69 (черная сплошная ломаная линия) с отмеченными позициями измерений ВНГО. Цветом точек отмечено отклонение измеренного ВНГО при помощи лидара от рассчитанного ВНГО в атмосферном реанализе ERA5 в соответствии с используемой цветовой шкалой

Также были построены квантиль-квантиль диаграммы для трех широтных зон, отражающие соответствие эмпирически оцениваемых распределений модельных оценок ВНГО по данным ERA5 и референсных значений, измеренных лидаром (см. рисунки 5–8). На рисунках 9–12 мы приводим гистограммы ошибок модельных оценок ВНГО по данным ERA5 по сравнению с лидарными измерениями для тех же широтных зон.

Анализ квантиль-квантильных диаграмм (рисунки 5, 6, 7, 8) показывает неоднородное соответствие между высотой нижней границы облачности (ВНГО), измеренной лидаром, и данными ERA5. Систематическое занижение ВНГО моделью ERA5 наблюдается во всех широтных зонах при низких значениях ВНГО (<1000 м). Это свойство наиболее выражено в тропиках (рисунок 6), также заметно в умеренных южных широтах и Антарктике (рисунок 7). В умеренных северных широтах (рисунок 5) соответствие лучше, но при высоких значениях ВНГО (>2000 м) ERA5 несколько завышает высоту. В умеренных южных широтах и Антарктике (рисунок 7) при высоких значениях ВНГО ERA5 также демонстрирует более высокое значение, что может быть связано с регистрацией перистых облаков, недоступных для лидарных измерений используемым прибором. В целом, ERA5 демонстрирует систематические погрешности в определении ВНГО, особенно при низких высотах нижней границы облачности. Разделение анализа по широтным зонам поможет лучше понять региональные особенности этих расхождений.

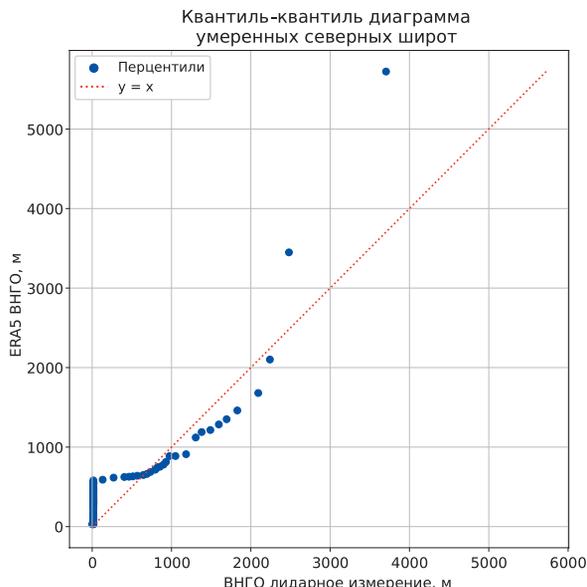


Рис. 5 – Квантиль-квантиль диаграмма, отражающая соответствие эмпирически оцениваемых распределений модельных оценок ВНГО по данным ERA5 и референсных значений, измеренных лидаром в зоне севернее 23° с. ш.

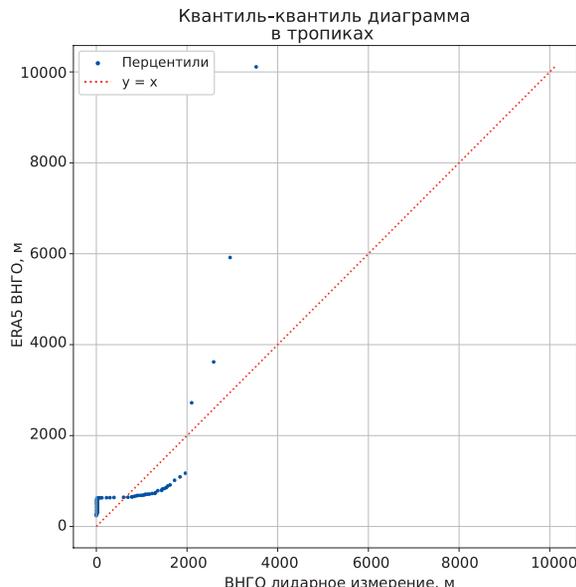


Рис. 6 – Квантиль-квантиль диаграмма, отражающая соответствие эмпирически оцениваемых распределений модельных оценок ВНГО по данным ERA5 и референсных значений, измеренных лидаром в зоне от 23° ю. ш. до 23° с. ш.

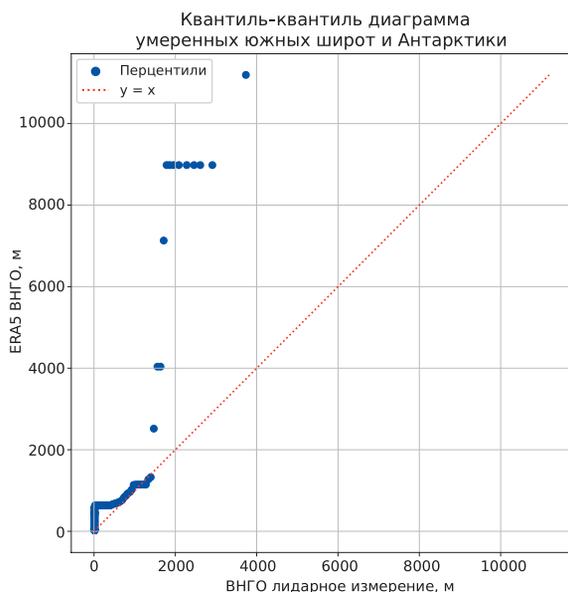


Рис. 7 – Квантиль-квантиль диаграмма, отражающая соответствие эмпирически оцениваемых распределений модельных оценок ВНГО по данным ERA5 и референсных значений, измеренных лидаром в зоне южнее 23° ю. ш.

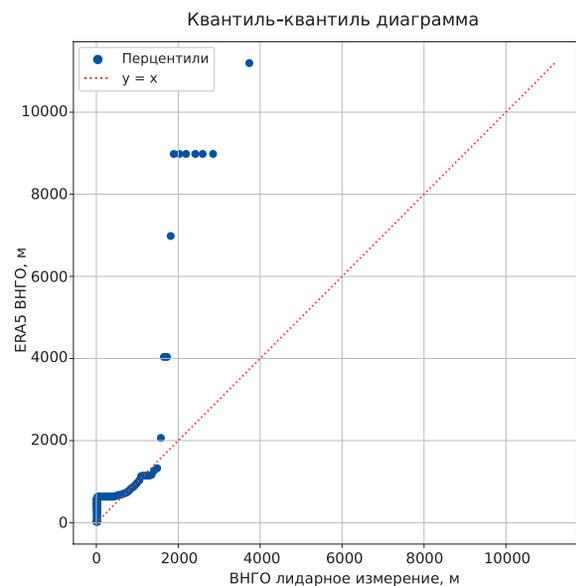


Рис. 8 – Квантиль-квантиль диаграмма, отражающая соответствие эмпирически оцениваемых распределений модельных оценок ВНГО по данным ERA5 и референсных значений, измеренных лидаром в зоне рамках всей экспедиции РАЭ-69

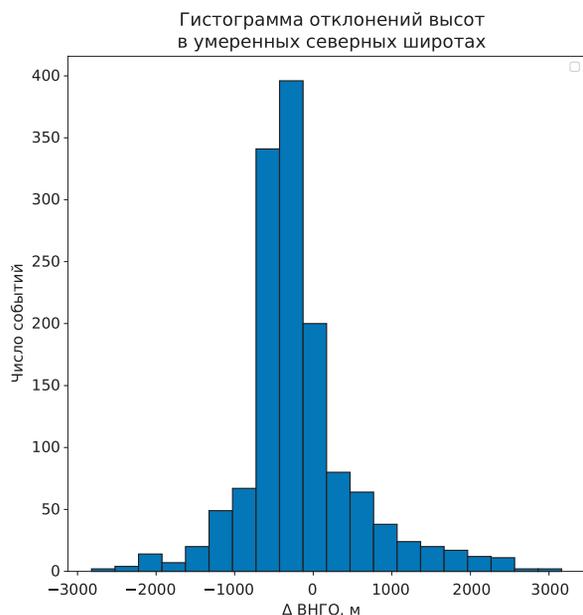


Рис. 9 – Распределение ошибки модельной оценки ВНГО по сравнению с лидарными измерениями в зоне севернее 23° с. ш.

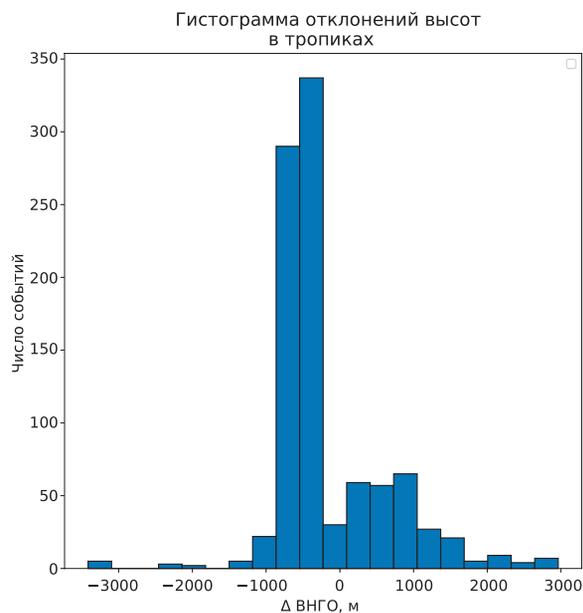


Рис. 10 – Распределение ошибки модельной оценки ВНГО по сравнению с лидарными измерениями в зоне от 23° ю. ш. до 23° с. ш.

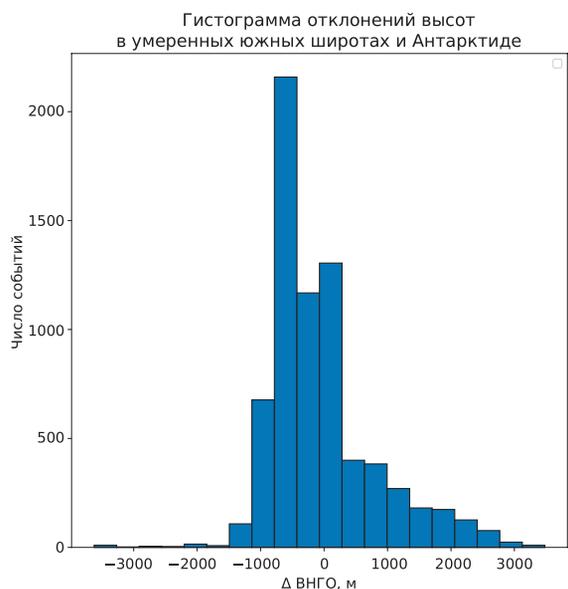


Рис. 11 – Распределение ошибки модельной оценки ВНГО по сравнению с лидарными измерениями в зоне южнее 23° ю. ш.

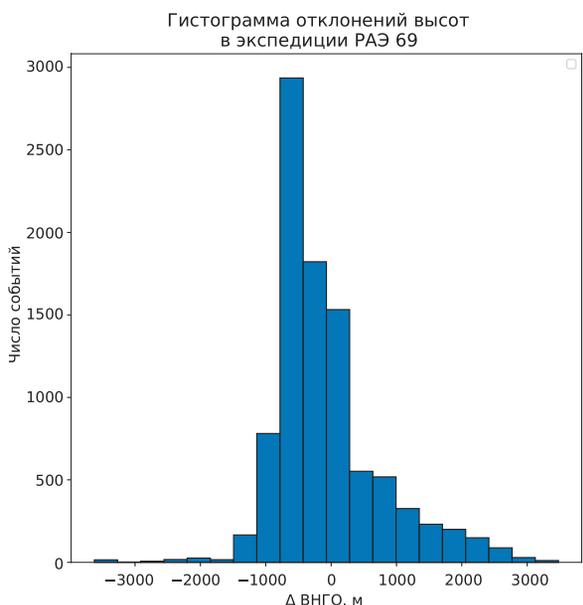


Рис. 12 – Распределение ошибки модельной оценки ВНГО по сравнению с лидарными измерениями в рамках всей экспедиции «РАЭ-69»

Представленные гистограммы ошибок модельной оценки ВНГО по сравнению со значениями, измеренными с применением лидара (рисунки 9–12), иллюстрируют распределения отклонений высоты нижней границы облачности между лидарными измерениями и данными реанализа ERA5 для различных широтных зон.

Во всех четырех гистограммах распределения ошибки модельной оценки ВНГО, по сравнению с лидарными измерениями, сохраняется асимметрия распределения с

пиком в области отрицательных значений. Это подтверждает систематическое занижение высоты нижней границы облачности моделью ERA5, наблюдаемое во всех рассмотренных широтных зонах. Степень этого систематического смещения, судя по положению пика, остается примерно такой же, как и до фильтрации.

В итоге зафиксировано систематическое занижение ВНГО моделью ERA5. Это указывает на то, что данное занижение является не случайной ошибкой, а скорее систематическим недостатком модели, требующим дальнейшего исследования и, возможно, корректировки.

Заключение

В ходе проведенного исследования была выполнена валидация высоты нижней границы облачности (ВНГО), представленной в данных реанализа ERA5, с использованием высокоточных данных, полученных с применением судового лидара, установленного на борту научно-экспедиционного судна «Академик Федоров». Результаты показывают, что в данных ERA5 наблюдаются систематические отклонения от инструментальных измерений, что демонстрирует наличие потенциала повышения качества моделирования свойств облачности в реанализе.

Визуализация ошибок модельных оценок ВНГО в данных реанализа на карте трека экспедиции демонстрирует пространственную неоднородность таких отклонений. Анализ среднего смещения и стандартного отклонения ошибок ВНГО по данным ERA5 указывает на значительные расхождения, особенно в условиях низкой облачности. Эти результаты согласуются с выводами предыдущих исследований, таких, как работы Wang et al. (2022) и Moraru et al. (2022). По результатам анализа с выделением широтных зон можно видеть, что ERA5 имеет тенденцию к занижению значений ВНГО в тропических и умеренных широтах.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках Госзадания № FMWE-2022-0002. Обработка данных реанализа ERA5 выполнена в рамках работ по Соглашению № 075-03-2024-117 от 17.01.2024. Логистическая поддержка оказана стратегическим проектом «Исследовательское лидерство (от бакалавра до нобелевского лауреата)» программы «Приоритет-2030» Московского физико-технического института.

Список литературы

1. *Borisov M., Krinitskiy M.* Assessing the uncertainty of expert observations of cloud characteristics based on data from a field campaign in the Arctic ocean in August-September 2021 // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2022. P. EGU22-10605. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10605>.
2. *Borisov M. A., Krinitskiy M. A., Tilinina N. D.* Estimating Cloud Base Height From All-Sky Imagery Using Artificial Neural Networks // Moscow University Physics Bulletin. 2023. Vol. 78. No. Suppl 1. P. S85–S95. <https://doi.org/10.3103/S0027134923070020>.

3. *Hersbach H. et al.* The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
4. *Krinitkiy M. et al.* Machine Learning Models for Approximating Downward Short-Wave Radiation Flux over the Ocean from All-Sky Optical Imagery Based on DASIO Dataset // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. No. 7. P. 1720. <https://doi.org/10.3390/rs15071720>.
5. *Kundu A. et al.* The behavior of cloud base height over a hilly remote station of North-East India using ground-based remote sensing technique // Atmospheric Research. 2023. Vol. 282. P. 106512. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106512>.
6. *Li D. et al.* Validation and revision of low latitudes cloud base height from ERA5 // Atmospheric Research. 2024. Vol. 309. P. 107595. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107595>.
7. *Moraru E. I., Pustovalov K. N., Kharyutkina E. V.* Analysis of cloud base height variability in Western Siberia based on reanalysis and observational data over the period 2000–2020 // 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. SPIE, 2022. Vol. 12341. P. 1119–1125. <https://doi.org/10.1117/12.2644423>.
8. *Pal S. R., Steinbrecht W., Carswell A. I.* Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent // Applied optics. 1992. Vol. 31. No. 10. P. 1488–1494. <https://doi.org/10.1364/AO.31.001488>.
9. *Rosenfeld D. et al.* Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorm feeder clouds in Argentina // Journal of applied meteorology and climatology. 2006. Vol. 45. No. 9. P. 1261–1281. <https://doi.org/10.1175/JAM2403.1>.
10. *Showalter A. K.* Evaporative capacity of unsaturated air // Water Resources Research. 1971. Vol. 7. No. 3. P. 688–691. <https://doi.org/10.1029/WR007i003p00688>.
11. *Tetzner D., Thomas E., Allen C.* A validation of ERA5 reanalysis data in the Southern Antarctic Peninsula—Ellsworth land region, and its implications for ice core studies // Geosciences. 2019. Vol. 9. No. 7. P. 289. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070289>.
12. *Wang R. et al.* A new algorithm for estimating low cloud-base height in southwest China // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2022. Vol. 61. No. 9. P. 1179–1197. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-21-0221.1>.
13. *Zuev S. V., Krasnenko N. P.* Experimental optoelectronic model of ceilometer for cloud base height measurement // Fifteenth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics / Atmospheric Physics. SPIE, 2009. Vol. 7296. P. 141–145. <https://doi.org/10.1117/12.823812>.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024, одобрена к печати 16.12.2024.

Для цитирования: Борисов М. А., Кринецкий М. А., Ежова Е. А., Тилинина Н. Д. Валидация высоты нижней границы облачности в реанализе ERA-5 по показаниям судового лидара // Океанологические исследования. 2024. № 52 (4). С. 6–19. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(4\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(4).1).

ERA5 CLOUD BASE HEIGHT VALIDATION BASED ON MARINE LIDAR

M. A. Borisov^{1,2}, M. A. Krinitskiy^{1,2}, E. A. Ezhova^{1,2}, N. D. Tilinina¹

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9, Institutskiy pereulok, Dolgoprudny, 141701, Russia,
e-mail: borisov.ma@phystech.su

The Cloud Base Height (CBH) is a key parameter that influences climate conditions and aviation safety. Additionally, in some cases, CBH can serve as an estimate of the thickness of the planetary boundary layer. Accurate assessment of CBH is important for meteorological forecasts and the evaluation of the atmospheric climate characteristics and their trends.

This article presents the results of the validation of the Cloud Base Height (CBH) obtained from the ERA5 reanalysis using high-precision data collected from the shipborne lidar of the research vessel “Akademik Fedorov” during the 69th Russian Antarctic Expedition (RAE-69). For validation, the model estimates of CBH from the ERA5 reanalysis, provided at a spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ and a temporal resolution of 1 hour, are compared with the lidar data, which were obtained in monitoring measurements with a 1-minute interval.

The analysis results showed that the ERA5 data exhibit systematic deviations from the instrumental measurements, which is confirmed by the sample evaluation of the mean bias and standard deviation of the errors in the model estimates of CBH. A similar conclusion can be drawn by examining the quantile-quantile diagram of CBH values in the ERA5 model estimates and the lidar measurement data. The error map analysis of ERA5 reveals an uneven spatial distribution and a significant dependence on the latitude of observations. The results of this research can be used for further research in the fields of meteorology and climatology, as well as for improving the methods of modeling the Cloud Base Height.

Keywords: cloud base height, ERA5, shipborne lidar, validation, meteorology, cloudiness, Cloud Base Height

Acknowledgement: This research was conducted as part of the State Assignment No. FMWE-2022-0002. The processing of ERA5 reanalysis data was carried out under Agreement No. 075-03-2024-117 dated January 17, 2024. Logistical support was provided by the strategic project “Research Leadership (from Bachelor to Nobel Laureate)” within the “Priority-2030” program of the Moscow Institute of Physics and Technology.

References

1. Borisov, M. and M. Krinitskiy, 2022: *Assessing the uncertainty of expert observations of cloud characteristics based on data from a field campaign in the Arctic ocean in August–September*. 2021. EGU General Assembly Conference Abstracts, EGU22-10605. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10605>.
2. Borisov, M. A., M. A. Krinitskiy, and N. D. Tilinina, 2023: Estimating Cloud Base Height From All-Sky Imagery Using Artificial Neural Networks. *Moscow University Physics Bulletin*, **78** (1), S85–S95, <https://doi.org/10.3103/S0027134923070020>.

3. Hersbach, H. et al., 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146** (730), 1999–2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
4. Krinitskiy, M. et al., 2023: Machine Learning Models for Approximating Downward Short-Wave Radiation Flux over the Ocean from All-Sky Optical Imagery Based on DASIO Dataset. *Remote Sensing*, **15** (7), 1720, <https://doi.org/10.3390/rs15071720>.
5. Kundu, A. et al., 2023: The behavior of cloud base height over a hilly remote station of North-East India using ground-based remote sensing technique. *Atmospheric Research*, **282**, 106512, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106512>.
6. Li, D. et al., 2024: Validation and revision of low latitudes cloud base height from ERA5. *Atmospheric Research*, **309**, 107595, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107595>.
7. Moraru, E. I., K. N. Pustovalov, and E. V. Kharyutkina, 2022: Analysis of cloud base height variability in Western Siberia based on reanalysis and observational data over the period 2000–2020. *28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. SPIE*, **12341**, 1119–1125, <https://doi.org/10.1117/12.2644423>.
8. Pal, S. R., W. Steinbrecht, and A. I. Carswell, 1992: Automated method for lidar determination of cloud-base height and vertical extent. *Applied optics*, **31** (10), 1488–1494, <https://doi.org/10.1364/AO.31.001488>.
9. Rosenfeld, D. et al., 2006: Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorm feeder clouds in Argentina. *Journal of applied meteorology and climatology*, **45** (9), 1261–1281, <https://doi.org/10.1175/JAM2403.1>.
10. Showalter, A. K., 1971: Evaporative capacity of unsaturated air. *Water Resources Research*, **7** (3), 688–691, <https://doi.org/10.1029/WR007i003p00688>.
11. Tetzner, D., E. Thomas, and C. Allen, 2019: A validation of ERA5 reanalysis data in the Southern Antarctic Peninsula—Ellsworth land region, and its implications for ice core studies. *Geosciences*, **9** (7), 289, <https://doi.org/10.3390/geosciences9070289>.
12. Wang, R. et al., 2022: A new algorithm for estimating low cloud-base height in southwest China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **61** (9), 1179–1197, <https://doi.org/10.1175/jamc-d-21-0221.1>.
13. Zuev, S. V. and N. P. Krasnenko, 2009: Experimental optoelectronic model of ceilometer for cloud base height measurement. *Fifteenth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics/Atmospheric Physics. SPIE*, **7296**, 141–145, <https://doi.org/10.1117/12.823812>.

Submitted 02.09.2024, accepted 16.12.2024.

For citation: Borisov, M. A., M. A. Krinitskiy, E. A. Ezhova, and N. D. Tilinina, 2024: ERA5 cloud base height validation based on marine lidar. *Journal of Oceanological Research*, **52** (4), 6–19, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(4\).1](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(4).1).