

Оптические и геометрические характеристики облаков верхнего яруса по данным лазерного поляризационного зондирования 2009–2023 гг. в Томске

И.Д. Брюханов^{✉ 1, 2}, О.И. Кучинская¹, Е.В. Ни¹, М.С. Пензин¹,
И.В. Животенюк¹, А.А. Дорошкевич¹, Н.С. Кириллов¹,
А.П. Стыкон¹, **В.В. Брюханова¹**, И.В. Самохвалов^{1*}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 18.07.2023;
после доработки 22.08.2023;
принята к печати 23.08.2023

Повышение точности прогнозов погоды и климата требует углубленного понимания атмосферных процессов и явлений, которые определяются, в том числе, облаками верхнего яруса (ОВЯ). Представлены результаты экспериментов по поляризационному лазерному зондированию ОВЯ. Объединены данные систематических измерений на высотном матричном поляризационном лидаре Томского государственного университета с декабря 2009 по июль 2023 г. Определены оптические (матрица обратного рассеяния света, оптическая толщина, отношение рассеяния) и геометрические (высота нижней и верхней границ, вертикальная мощность) характеристики ОВЯ. Массив данных дополнен вертикальными профилями метеорологических величин (температура, относительная и удельная влажность, направление и скорость ветра), полученными по данным аэрологического зондирования и реанализа ERA5. Оценена частота регистрации ОВЯ и частота регистрации ОВЯ с преимущественно горизонтальной ориентацией частиц. Полученные результаты объединены в базу данных (БД), которая использовалась для создания программного продукта на основе нейронных сетей для восстановления зависимостей между метеорологическими параметрами атмосферы и оптическими характеристиками ОВЯ. БД может применяться для различных, в том числе самостоятельных, вариантов обучения решению задач атмосферной оптики.

Ключевые слова: облака верхнего яруса, ориентированные ледяные кристаллы, поляризационный лидар, матрица обратного рассеяния света, аэрологическое зондирование, реанализ ERA5, базы данных, искусственные нейронные сети, простой многослойный перцептрон, метод случайного леса, метод главных компонент, автокодировщик, кросс-валидация; high-level clouds, oriented ice crystal, polarization lidar, back-scattering phase matrix, radiosonde observations, ERA5 reanalysis, database, artificial neural network, simple multi-layer perceptron, random forest method, primary component analysis, autoencoder, cross-validation.

Введение

Ввиду все более заметных изменений климата создание и развитие эмпирических моделей, обеспечивающих прогнозирование погоды и климата с повышенной точностью, является актуальной задачей.

* Илья Дмитриевич Брюханов (plyton@mail.tsu.ru); Олеся Ивановна Кучинская (okuchin@cern.ch); Евгений Вячеславович Ни (wolf.ni@yandex.ru); Максим Сергеевич Пензин (penzin.maksim@gmail.com); Иван Владимирович Животенюк (guitarplayer@mail.tsu.ru); Антон Александрович Дорошкевич (adoro@mail.tsu.ru); Николай Степанович Кириллов (kns68@mail.tsu.ru); Александр Петрович Стыкон (stikon@yandex.ru); Валентина Владимировна Брюханова; Игнатий Викторович Самохвалов (lidar@mail.tsu.ru).

Ее решение требует углубленного понимания атмосферных процессов и явлений. Облака верхнего яруса (ОВЯ) вносят весомый вклад в процессы погоды и климатообразования вследствие большой (до тысячи километров) горизонтальной протяженности [1]. Одним из основных факторов, влияющих на пропускание оптического излучения ОВЯ, является их микроструктура, характеризующаяся параметрами распределений частиц льда в облаке по форме, размерам и пространственной ориентации, которые зависят от метеорологической обстановки. Ориентация несферических частиц льда в ОВЯ плоскими гранями преимущественно горизонтально приводит к аномально высоким коэффициентам обратного рассеяния [2–5]. Облака, содержащие такие частицы, получили название зеркальных.

Параметры распределений частиц в облаках по размерам и форме могут быть определены на основе проб воздуха. Однако информация об ориентации частиц при этом теряется. Ее можно получить только дистанционно и только методом лазерного поляризационного зондирования. Он основан на эффекте трансформации состояния поляризации лазерного излучения при рассеянии на частицах льда (например, [4, 6, 7]). Метод реализован на высотном матричном поляризационном лидаре (ВМПЛ) НИ ТГУ, зарегистрированном в реестре уникальных экспериментальных установок России. В отличие от зарубежных и отечественных аналогов, этот лидар позволяет систематически, в режиме мониторинга, экспериментально получать полные матрицы обратного рассеяния света (МОРС) облаков. Как известно из работ Г.В. Розенберга (например, [8]), угловые и спектральные зависимости матриц рассеяния содержат максимальный объем информации о микрофизических параметрах ансамбля частиц, какой только можно получить в эксперименте по рассеянию света.

Массив данных, полученных на ВМПЛ с 2009 по 2023 г., содержит результаты более чем 3000 серий измерений характеристик ОВЯ. Эти данные имеют важное значение в решении задач экологического мониторинга, динамики и физики атмосферы, поскольку позволяют оценить параметры ОВЯ, в значительной степени определяющие их радиационные характеристики. Однако прогнозирование радиационных характеристик ОВЯ по совокупности измеряемых метеорологических величин на высотах их образования в настоящее время затруднено ввиду сложности и многофакторности этой задачи и отсутствия адекватных математических моделей, устанавливающих связи между оптическими, микрофизическими, геометрическими характеристиками ОВЯ и метеорологической обстановкой, приводящей к их формированию и эволюции.

Целью работы является создание нейронной сети для получения этих связей, обучение которой происходит на основе накопленного массива лидарных и метеорологических данных.

1. Материалы и методы

1.1. Высотный матричный поляризационный лидар НИ ТГУ

Блок-схема и характеристики ВМПЛ НИ ТГУ, а также вопросы выявления преимущественно горизонтальной ориентации частиц льда в ОВЯ описаны в работах [7, 9–11]. Передающая и приемная системы ВМПЛ оснащены поляризационными блоками, позволяющими зондировать атмосферу излучением с четырьмя состояниями поляризации и определять для каждого зондирующего импульса вектор-параметр Стокса обратного рассеянного излучения.

В ранних экспериментах на ВМПЛ для определения МОРС интенсивности 16 лидарных сигналов измерялись последовательно [7, 11]. Предпола-

галось, что в генеральном ансамбле частиц, формирующих сигнал обратного рассеяния, сохраняются их микрофизические характеристики, а меняется за время измерений элементов МОРС лишь их концентрация. В реальности за время сеанса зондирования облако движется по направлению ветра, вследствие чего меняются объемы, из которых поступает рассеянное назад излучение и, как следствие, частицы, формирующие лидарный сигнал и их количество.

С 2016 г. лидарные сигналы регистрируются с параллельным накоплением массивов одноэлектронных импульсов, что позволяет на одном и том же временном интервале с одинаковой погрешностью оценивать все 16 элементов МОРС. Положения поляризационных блоков постоянно меняются, и потому движение исследуемых объемов воздуха в поле зрения телескопа одинаково влияет на результаты измерений для каждого элемента МОРС. Также параллельное накопление сигналов позволяет непрерывно вести длительный эксперимент и затем выбирать для обработки интервалы времени, соответствующие заданным критериям [10]. В работе [12] аргументирована возможность объединения в единый массив результатов измерений, выполненных в обоих режимах лидарного эксперимента.

1.2. Источники данных по вертикальным профилям метеорологических величин

Исследование ОВЯ требует сопоставления их экспериментально определяемых характеристик с соответствующей метеорологической обстановкой. Помимо оценки значений метеовеличин на высотах формирования регистрируемых лидаром облаков такое сопоставление используется для выявления антропогенных ОВЯ (следов самолетов, например, [10]).

Аэрологические измерения являются наиболее достоверным источником вертикальных профилей метеовеличин. Для оценки метеорологической обстановки над г. Томском используются данные аэрологического зондирования (РАОВ, сокращение от radio-sonde observations), выполняемого на ближайших к нему станциях в г. Колпашево и Новосибирске. На сайте Вайомингского университета [13] доступны результаты аэрологических измерений, выполняемых дважды в сутки (00:00 и 12:00 UTC). Представляет интерес нахождение источника метеоданных для координат ВМПЛ с более высоким временным разрешением.

Реанализ ERA5. В поисках альтернативного источника метеоданных для интерпретации результатов лидарных экспериментов выполнялась оценка корректности использования реанализа ERA5 [14]. Он обеспечивает высокое пространственно-временное разрешение ($0,25 \times 0,25^\circ$, 1 ч) и объединяет непрерывные ряды метеоданных с 1979 г. по настоящее время. В качестве источников данных используются измерения по всему земному шару спутниковыми радиометрами, наземными, корабельными

и самолетными метеостанциями, метеобуями, шар-зондами, наземными радаром [15]. Временные ряды температуры воздуха и ее производных в реанализах семейства ERA однородны для территории Сибири, поэтому они могут использоваться для выявления пространственной неоднородности, обусловленной местными факторами [16].

Верификация реанализа ERA5. Известны работы, в которых ERA5 использовался для изучения атмосферы (например, [17–20]). ВМПЛ обеспечивает высокое временное (2–3 мин) и пространственное (от 37,5 м) разрешение, поэтому была выполнена оценка корректности использования ERA5 для обработки и интерпретации результатов лидарных измерений [9]. Сопоставлены данные RAOB и ERA5 по температуре, относительной и удельной влажности воздуха, а также по направлению и скорости ветра. Первые три характеристики влияют на рост и морфологические свойства кристаллов льда в ОВЯ [21], а характеристики ветра используются при расчете параметров дрейфа облаков под действием ветра. Вертикальные профили строились для стандартных изобарических поверхностей в диапазоне от 1000 до 50 гПа, который соответствует высотам примерно от 0 до 20 км и включает рабочий диапазон ВМПЛ (0–15 км). Массив значений метеовеличин охватывал все дни 2016–2020 гг., два момента времени в каждом дне (время измерений на аэрологических станциях) и пять координатных точек (точек стояния аэрологических станций). Аналогично работам [17, 22] построены вертикальные профили среднеквадратических отклонений метеовеличин ERA5 от RAOB, а также средней разности и коэффициента корреляции этих значений.

Полученные результаты показали допустимость применения реанализа ERA5 для определения вертикальных профилей температуры и направления ветра, необходимых при изучении свойств ОВЯ.

Скорость ветра тоже может применяться для таких исследований, но, возможно, потребуются дополнительное сопоставление с данными RAOB. Вертикальные профили удельной и относительной влажности значительно отличаются от измеренных радиозондами [9].

2. Результаты и обсуждение

2.1. Подборка лидарно-метеорологических данных

Как уже отмечалось, на основе измерений на ВМПЛ выявляются зеркальные ОВЯ. Ранее в [10] были получены распределения доли зарегистрированных лидаром зеркальных ОВЯ по данным 2016–2020 гг. Наиболее часто обстановка, благоприятная для зондирования (отсутствие осадков, порывистого ветра и облаков нижних ярусов), наблюдалась весной; осенью и зимой — заметно реже, сопоставимо между этими двумя сезонами. Зеркальные ОВЯ чаще наблюдались осенью, реже — весной и летом. Кроме того, в работе [10] представлены высоты зеркальных частей ОВЯ (середин вертикальных мощностей) и соответствующие значения относительной влажности и температуры воздуха, а также точки росы по данным RAOB за тот же период. Зеркальные ОВЯ наиболее часто наблюдались на высотах 5–6 и 10–11 км при относительной влажности воздуха 30–40%, температуре воздуха –60...–50 °С и точке росы –70...–60 °С. На рис. 1 представлены распределения частоты лидарных измерений с декабря 2009 по апрель 2023 г. включительно (более 3100 серий, около 800 ч).

Заметно учащение экспериментов в 2017 г., что вызвано прежде всего установлением методики измерений с параллельным накоплением лидарных сигналов и отказом от последовательного накопления сигналов. Налицо резкое сокращение частоты измерений в 2020–2022 гг. в связи с пандемией

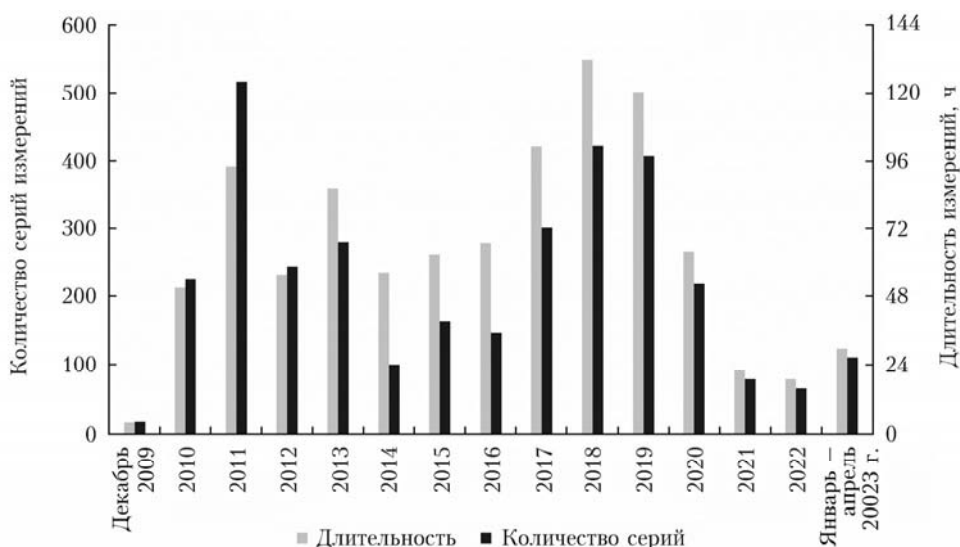


Рис. 1. Распределения частоты измерений на ВМПЛ в 2009–2023 гг.

COVID-19. Рис. 2 иллюстрирует распределение измерений, в течение которых регистрировались ОВЯ (более 1300 серий, более 350 ч). Примечателен схожий характер распределений на рис. 1 и 2.

На рис. 3 изображены распределения значений высот нижней и верхней границ, а также вертикальной мощности ОВЯ по данным измерений 2009–2023 гг. Как видно, ОВЯ регистрировались над Томском во всем диапазоне высот 5–12 км.

На рис. 4 представлены соответствующие распределения оптической толщи τ и отношения рас-

сеяния R ОВЯ. Значения $\tau \leq 1$ [7, 10, 11], характерные для зеркальных ОВЯ, фиксировались чаще, чем для незеркальных; значения R примерно в половине случаев характерны для незеркальных ОВЯ ($R < 10$).

Для оценки частоты регистрации зеркальных ОВЯ распределений на рис. 4 недостаточно; не менее важным для их идентификации является элемент m_{44} МОРС. К настоящему моменту оценка МОРС выполнена не для всего 14-летнего массива лидарных данных; эта работа продолжается.

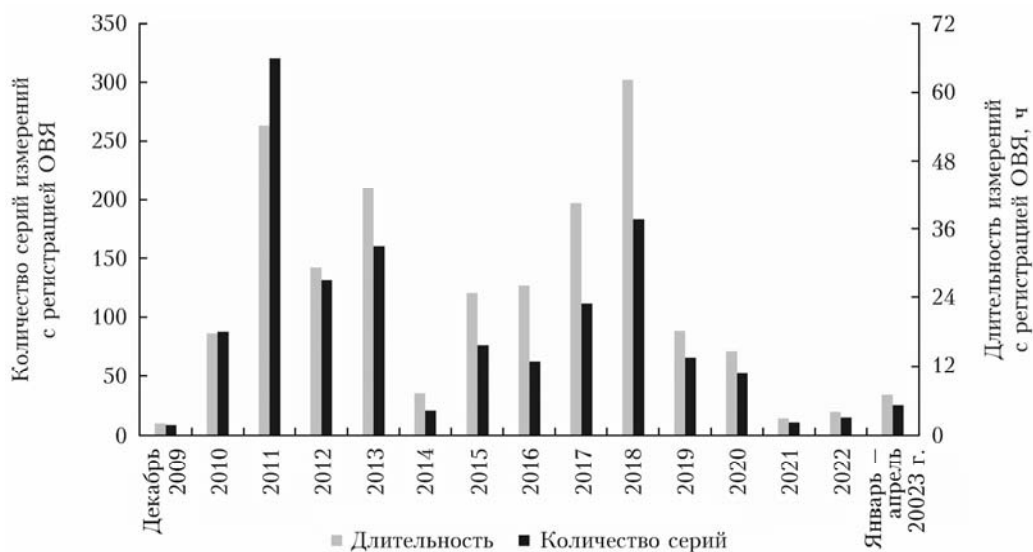


Рис. 2. Распределения частоты измерений на ВМПЛ с регистрацией ОВЯ в 2009–2023 гг.

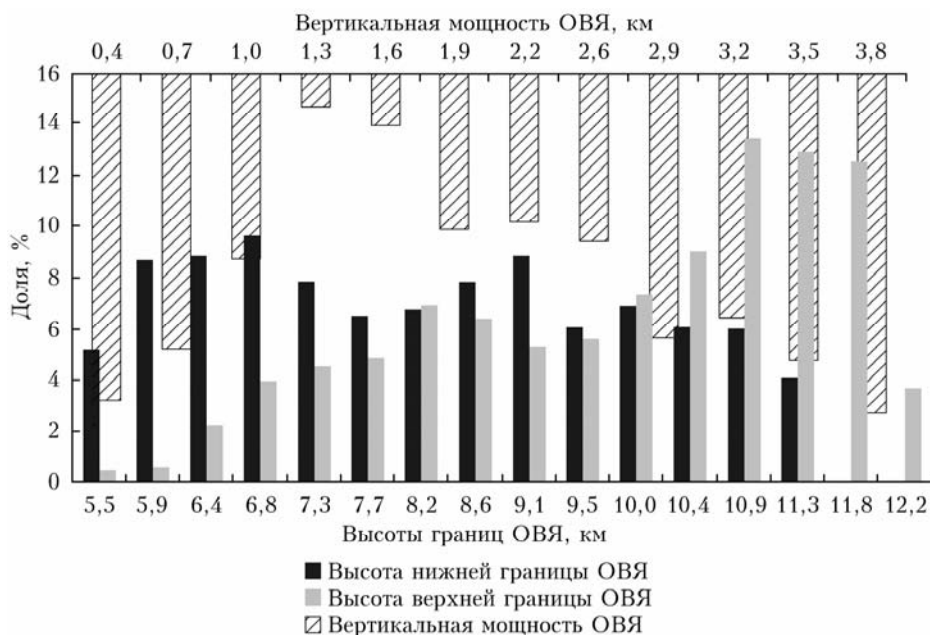


Рис. 3. Распределения значений высот нижней и верхней границ, а также вертикальной мощности ОВЯ по данным лидарных измерений 2009–2023 гг.

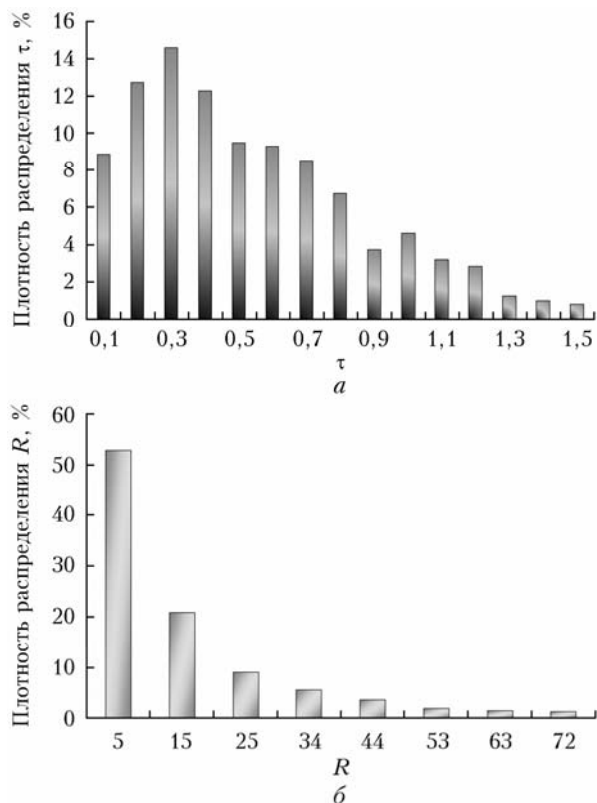


Рис. 4. Распределения значений оптической толщи (*а*) и отношения рассеяния (*б*) ОВЯ по данным лидарных измерений 2009–2023 гг.

Около 30% ОВЯ над Томском, зарегистрированных ВМПЛ в 2016–2020 гг., были зеркальными [10], что повторяет выводы работ [3, 23].

2.2. Предварительный анализ данных с использованием методов машинного обучения

Для оценки элементов МОРС ОВЯ и определения высот их границ создан прототип программного продукта (ПП) на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) [24, 25]. ПП использует алгоритмы машинного обучения для прогнозирования оптических и геометрических характеристик ОВЯ на основе метеоданных. Прототип может использоваться для тестирования различных моделей и определения наиболее эффективного подхода, а также для демонстрации возможностей готового продукта. Как упоминалось во введении, существующие модели атмосферы имеют ряд недостатков. ИНС способны учитывать сложное взаимодействие метеопараметров друг с другом и восстанавливать практически любую зависимость характеристик ОВЯ от этих параметров, если она имеется. В процессе создания ПП наибольшую сложность представляло определение архитектуры ИНС, функции потерь и способа подачи входных параметров (признаков). Каждая из этих проблем влияла на самую главную —

переобучение, когда ИНС перестает обобщать данные и настраивается на них.

При выборе архитектуры ИНС и одной из возможных моделей машинного обучения мы отталкивались от практической эвристики: количество параметров для настройки модели должно быть меньше набора данных, используемых для обучения. При выполнении данного условия ИНС начинает обобщать данные, а не запоминать их, что позволяет ограничить набор потенциальных архитектур для обучения. С этой целью выполнен предварительный анализ данных лидарных измерений за 2016–2020 гг. Массив данных обобщен в базе данных, содержащей информацию о 1177 сериях измерений (длительность одной серии составляла ~ 17 мин). Из них примерно в 316 случаях были обнаружены ОВЯ. Этого количества мало для обучения нейросети. Еще в 172 сериях также зарегистрированы ОВЯ, но лидарный сигнал от них был недостаточен для статистической обработки. Эти данные использованы для проверки точности прогнозирования ИНС высот формирования ОВЯ в зависимости от метеословий.

Результаты лидарных измерений сопоставлены с данными ERA5 в каждой точке вертикального профиля от 0 до 15 км по следующим метеопараметрам: температура и относительная и абсолютная влажность воздуха, скорость и направление ветра. Проблема статистической малости массива данных частично решена программно, что приемлемо на этапе разработки прототипа ПП; в качестве эталона использовался метод случайного леса со 100 деревьями [24]. Это позволило оценить потенциально оптимальный результат. В качестве ИНС взят многослойный персептрон со скрытым слоем из пяти нейронов — наиболее простая модель для малой статистики. Для оценки качества работы этих подходов также использованы среднеквадратичное отклонение и кросс-валидация из двух подвыборок. При оценке высоты регистрации ОВЯ были добавлены результаты измерений 2021–2023 гг. (50 серий) и данные 2009–2016 гг. (809 серий). Для уменьшения размерности входных данных, с целью сокращения параметров ИНС, применяли два алгоритма: метод главных компонент (Primary Component Analysis; PCA) и автокодировщик [24].

На рис. 5 представлено распределение элементов МОРС. Анализ результатов показал, что от метеопараметров зависят следующие величины: высота центра ОВЯ, элементы m_{22} и m_{44} нормированной МОРС ОВЯ; m_{33} требует дальнейшего изучения и расширения массива используемых данных. Для остальных величин зависимость от метеопараметров не наблюдается. Способ сжатия данных не влияет на результат.

Поскольку измерения проводились в различных условиях, можно ожидать сложные распределения измеряемой величины. Этому предположению удовлетворяют только элементы главной диагонали МОРС: m_{22} , m_{33} , m_{44} . Для остальных наблюдается

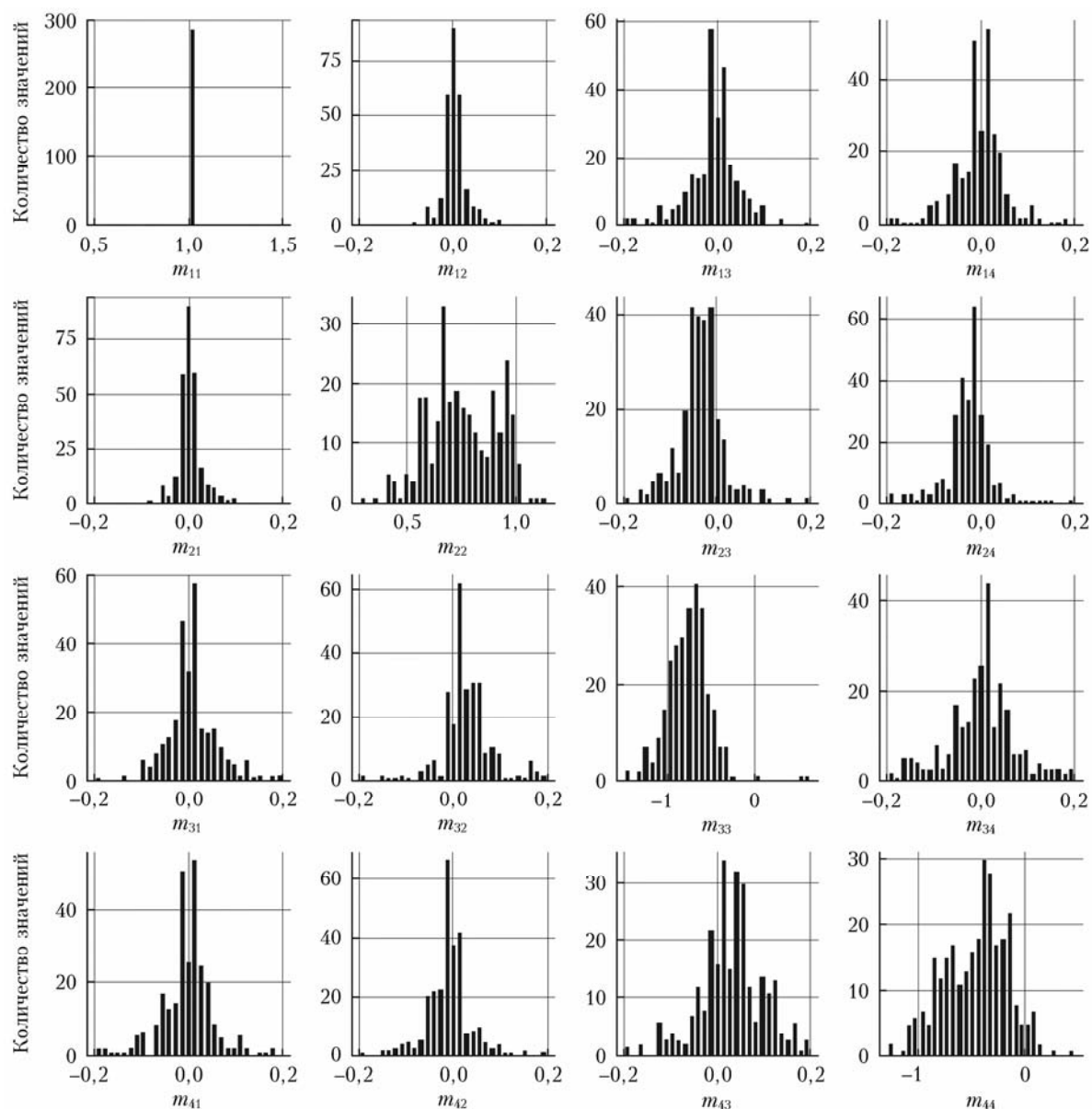


Рис. 5. Распределение значений элементов МОРС по данным 2016–2023 гг.

обычное гауссово распределение, что сигнализирует об отсутствии сложной зависимости от метеорологических параметров. На рисунках ниже приведены точечные диаграммы высоты ОВЯ (рис. 6), а также элементов МОРС m_{22} , m_{33} и m_{44} (рис. 7–9), полученные с помощью метода случайного леса и сжатия PCA. Высота центра ОВЯ прогнозируется с хорошей точностью (таблица). Точность определения элементов МОРС требует дальнейшего изучения,

что вызвано либо малостью использованного массива данных, либо слабой зависимостью от метеорологических параметров атмосферы. В первом случае требуется расширять массив, во втором — найти дополнительные данные для уточнения результата прогнозирования.

Метод случайного леса дал более качественный результат, чем простой многослойный персептрон. Наиболее вероятно, это вызвано двумя факторами: предобработка входных параметров и небольшое количество данных, пригодных для обучения. В качестве предобработки была выбрана обычная нормализация (приведение к нулевому среднему и единичной дисперсии), чего может быть недостаточно. Необходимо рассмотреть преобразования, приводящие распределения входных данных к симметричному виду и более близкому к нормальному.

Значения среднеквадратичного отклонения для метода случайного леса и сжатия PCA

Подвыборка	Высота центра ОВЯ, м	m_{22}	m_{33}	m_{44}
1	1097	0,12	0,17	0,24
2	1048	0,14	0,21	0,25
3	1178			
4	1095			

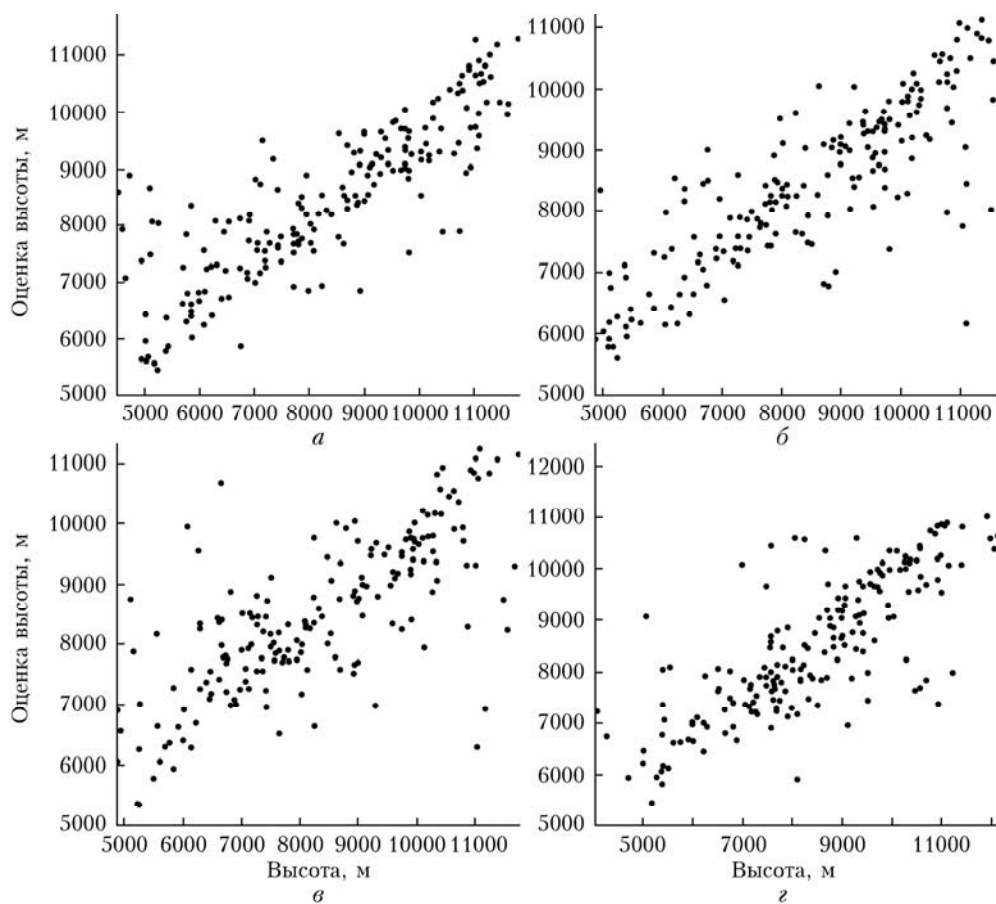


Рис. 6. Точечная диаграмма определения высоты центра ОВЯ: подвыборка 1 (а); 2 (б); 3 (в); 4 (г)

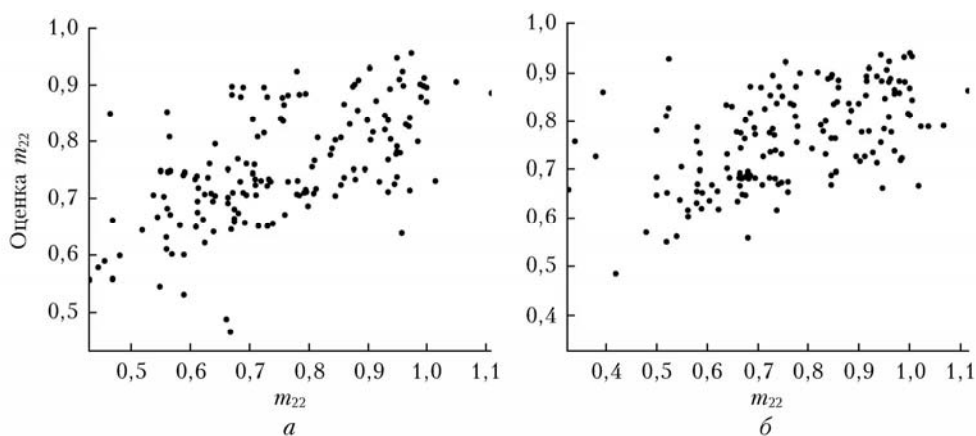


Рис. 7. Точечная диаграмма определения m_{22} МОРС: подвыборка 1 (а); 2 (б)

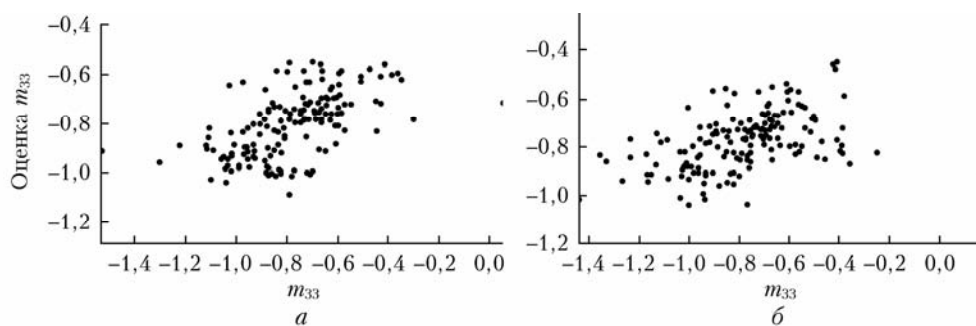


Рис. 8. Точечная диаграмма определения m_{33} МОРС: подвыборка 1 (а); 2 (б)

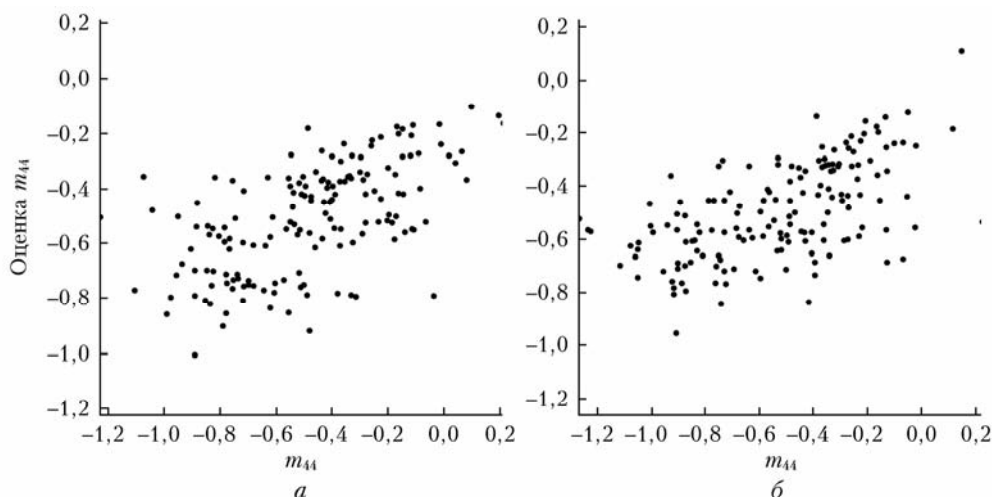


Рис. 9. Точечная диаграмма определения m_{44} МОРС: подвыборка 1 (а); 2 (б)

Размер массива данных также повлиял на работу ИНС. При усложнении ИНС она способна аппроксимировать более сложные функции, но при этом необходимо использовать больший объем данных. Небольшой объем данных приводил к переобучению сети и, следовательно, к ухудшению получаемых результатов.

Заключение

Описанный массив объединил данные около 800 ч лидарных измерений 2009–2023 гг. На их основе оценены оптические и геометрические характеристики ОВЯ. Результаты лидарных экспериментов дополнены вертикальными профилями метеорологических величин по данным аэрологических измерений и реанализа ERA5. Оценены значения метеовеличин, характерные для зеркальных ОВЯ. Полученный массив данных используется для обучения ИНС с целью восстановления зависимостей между метеорологическими параметрами и оптическими характеристиками ОВЯ. Установлено, что от метеопараметров зависят высота центра ОВЯ, а также элементы m_{22} и m_{44} нормированной МОРС ОВЯ; m_{33} требует дальнейшего изучения и расширения массива используемых данных. Для остальных элементов МОРС зависимость от метеопараметров не наблюдается.

Для улучшения результатов, а также установления дополнительных зависимостей между метеорологическими параметрами и характеристиками ОВЯ планируется провести исследования с учетом динамики изменения облаков с течением времени, пространственного градиента изменения метеорологических параметров в области эксперимента, антропогенного фактора. Также будет расширен массив экспериментальных данных за счет выполнения новых экспериментов по лазерному зондированию атмосферы.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 21-72-10089).

Список литературы

1. *Радиационные свойства перистых облаков* / под ред. Е.М. Фейгельсона. М.: Наука, 1989. 223 с.
2. Shanks J.G., Lynch D.K. Specular scattering in cirrus clouds // *Proc. SPIE*. 1995. V. 2578. P. 227–238.
3. Noel V., Chepfer H. A global view of horizontally oriented crystals in ice clouds from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. D00H23.
4. Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П. Наблюдение зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 4. С. 293–299.
5. Морозов А.М., Галилейский В.П., Елизаров А.И., Кокарев Д.В. Наблюдение зеркального отражения освещенной подстилающей поверхности облачным слоем из ледяных пластинок // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 1. С. 88–92.
6. Кауль Б.В. Оптико-локационный метод поляризационных исследований анизотропных аэрозольных сред: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 2004. 219 с.
7. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Брюханов И.Д. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 5. С. 403–411.
8. Розенберг Г.В. Вектор-параметр // *Успехи физ. наук*. 1955. Т. 56. С. 79–110.
9. Kuchinskaya O., Bryukhanov I., Penzin M., Ni E., Doroshkevich A., Kostyukhin V., Samokhvalov I., Pustovalov K., Bordulev I., Bryukhanova V., Stykon A., Kirilov N., Zhivotenyuk I. ERA5 reanalysis for the data interpretation on polarization laser sensing of high-level clouds // *Remote Sens.* 2023. V. 15, N 1. P. 109.
10. Брюханов И.Д. Оптические свойства облаков верхнего яруса естественного и антропогенного происхождения, содержащих ориентированные кристаллы льда, по данным поляризационного лазерного зондирования: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2022. 138 с.
11. Насонов С.В. Оптические характеристики облаков верхнего яруса и их связь с метеорологическими параметрами атмосферы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2015. 114 с.

12. *Hu E.B., Брюханов И.Д., Кучинская О.И., Пензин М.С., Животенюк И.В., Дорошкевич А.А., Кириллов Н.С., Самохвалов И.В.* Сравнительный анализ матриц обратного рассеяния света кристаллических облаков, полученных с параллельным и последовательным накоплением лидарных сигналов // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIX Междунар. симпоз. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2023. С. В-416–В-420.*
13. *University of Wyoming.* URL: <http://weather.uwyo.edu> (last access: 20.06.2023).
14. *Climate Data Store.* URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (last access: 20.06.2023).
15. *ECMWF.* URL: <https://www.ecmwf.int> (last access: 20.06.2023).
16. *Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М.* Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // *Вестн. НГУ. Сер.: Информационные технологии.* 2011. Т. 9, № 1. С. 56–66.
17. *Han Y., Yang Q., Nana L., Zhang K., Qing C., Li X., Wu X., Luo T.* Analysis of wind-speed profiles and optical turbulence above Gaomeigu and the Tibetan Plateau using ERA5 data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2021. V. 501, N 4. P. 4692–4702.
18. *Mayer J., Mayer M., Haimberger L.* Consistency and homogeneity of atmospheric energy, moisture, and mass budgets in ERA5 // *J. Clim.* 2021. V. 34, N 10. P. 3955–3974.
19. *Zhu J., Xie A., Qin X., Wang Y., Xu B., Wang Y.* An assessment of ERA5 reanalysis for Antarctic near-surface air temperature // *Atmosphere.* 2021. V. 12, N 2. P. 217.
20. *Griffiths R., Osborn J., Farley O., Butterley T., Townson M.J., Wilson R.* Demonstrating 24-hour continuous vertical monitoring of atmospheric optical turbulence // *Opt. Exp.* 2023. V. 31, N 4. P. 6730–6740.
21. *Um J., McFarquhar G.M., Hong Y.P., Lee S.-S., Jung C.H., Lawson R.P., Mo Q.* Dimensions and aspect ratios of natural ice crystals // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 7. P. 3933–3956.
22. *Шукин Г.Г., Иткин М.И., Караваев Д.М., Чичкова Е.Ф.* Валидация спутниковых данных температурно-влажностного зондирования атмосферы для Северо-Западного региона РФ // *II Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред / Материалы V Всероссийской научной конференции (Муром, 26–28 июня 2012 г.). Муром: Изд.-полиграф. центр МИ ВлГУ, 2012. С. 147–152.*
23. *Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Volkov S.N.* Investigating particle orientation in cirrus clouds by measuring backscattering phase matrices with lidar // *Appl. Opt.* 2004. V. 43, N. 36. P. 6620–6628.
24. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective / K.P. Murphy.* The MIT Press, 2012. 29 p.
25. *Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning.* New York: Springer, 2006. 778 p.

I.D. Bryukhanov, O.I. Kuchinskaya, E.V. Ni, M.S. Penzin, I.V. Zhivotenyuk, A.A. Doroshkevich, N.S. Kirillov, A.P. Stykon, V.V. Bryukhanov, I.V. Samokhvalov. Optical and geometrical characteristics of high-level clouds from the 2009–2023 data on laser polarization sensing in Tomsk.

To improve the accuracy of weather and climate forecasts, a deeper understanding of atmospheric processes and phenomena, which are determined, among other things, by high-level clouds (HLCs), is required. The experimental results on polarization laser sensing of high-level clouds are presented. The data of systematic (from December 2009 to present) lidar measurements performed with the high-altitude matrix polarization lidar developed at the Tomsk State University are combined. Optical (backscattering phase matrix, optical depth, and scattering ratio) and geometric (lower and upper boundary altitudes and vertical thickness) characteristics of clouds are determined from the lidar measurements. The dataset is supplemented with corresponding vertical profiles of meteorological quantities (temperature, relative and specific humidity, and wind direction and speed) obtained from radiosonde observations and ERA5 reanalysis. The frequency of lidar detection of HLCs and those of them which are characterized by the preferred horizontal orientation of non-spherical ice particles is estimated. The results were combined into a database and used to create a software product based on neural networks to retrieve the dependencies between the atmospheric meteorological parameters and HLC optical characteristics. The database can be used for various training options in solving problems of atmospheric optics including independent ones.