

Сравнительный анализ характеристик кучево-дождевых облаков по данным наземных наблюдений и спутникового зондирования на примере г. Томска

Е. И. Морару^{1,2}, Е. В. Харюткина^{1,3}, К. Н. Пустовалов^{1,2,3},
А. В. Скороходов², С. В. Смирнов^{1,3}

¹ *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
Томск, 634055, Россия
E-mails: moraruei@yandex.ru, kh_ev@mail2000.ru,
const.pv@yandex.ru, smirnov@imces.ru*

² *Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия
E-mail: vazime@yandex.ru*

³ *Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томск, 634050, Россия*

Проводится сравнительный анализ характеристик кучево-дождевых облаков (*Cb*) и связанных с ними метеорологических явлений конвективного происхождения по данным наземных измерений и спутниковых данных с 2013 по 2022 г. Были использованы данные лазерного зондирования и метеорологических измерений в двух пунктах наблюдения, расположенных в районе г. Томска. Привлекалась информация о характеристиках кучево-дождевой облачности, полученная с помощью процедуры обработки данных дистанционного зондирования атмосферы (спектрорадиометр MODIS — *англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Установлено, что связи между характеристиками кучево-дождевой облачности по данным MODIS (высота нижней границы, водозапас, оптическая толщина и эффективный радиус) и АМСГ (авиационной метеорологической станции гражданской), включая метеовеличины (высота нижней границы, относительная влажность и температура воздуха), наблюдаются только при прохождении их наиболее крупных организованных скоплений и носят нелинейный характер. Высокие оценки связи (коэффициент детерминации $\sim 0,80$) получены между высотой нижней границы (MODIS) и относительной влажностью воздуха (наземные измерения). Линейная связь (коэффициент детерминации 0,58) получена только для высоты нижней границы облачности между данными спутниковых и наземных измерений. Таким образом, эти два набора данных могут дополнять друг друга, поскольку спутниковые данные предоставляют информацию о характеристиках облачности, которые невозможно измерить с поверхности земли.

Ключевые слова: кучево-дождевая облачность, высота нижней границы облаков, спутниковое зондирование, наземные измерения, спектральные характеристики облаков, конвективные явления

Одобрена к печати: 21.05.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-307-318

Введение

В последние десятилетия вследствие роста глобальной температуры воздуха происходит увеличение повторяемости и интенсивности опасных метеорологических явлений (ОМЯ) (IPCC..., 2021), в том числе связанных с конвективной деятельностью (Третий..., 2022; Чернокульский и др., 2022). Эта закономерность, в частности, наблюдается как в полярных широтах над акваториями Карского и Баренцева морей (Безрукова, Чернокульский, 2020; Chernokulsky et al., 2017), так и над территорией сибирского региона (Комаров и др., 2015). Большое влияние на интенсивность ОМЯ, связанных с конвекцией, оказывает вид и состояние подстилающей поверхности, например городская застройка. Так, согласно исследованию (Platonov et al., 2024) над городом увеличивается экстремальность метеорологических явлений. Например, в Москве с 2007 по 2016 г. в летние месяцы на 50 % увеличилось количество

экстремальных явлений, связанных с ветром и осадками. Влияние города на осадки и конвективные явления показано в работах (Han et al., 2014; Shepherd, 2010). Для городских территорий, по сравнению с сельской местностью, характерны более высокие значения температуры воздуха, более интенсивные вертикальные потоки тепла и более высокий уровень шероховатости. Поэтому над городами чаще формируются мощные конвективные системы, сопровождаемые ОМЯ в виде сильных ливней, шквалов и других явлений (Vrasciu, 2023).

Изменение климата проявляется в варьировании характеристик конвективной облачности, в частности колебании высоты нижней границы (ВНГ) облаков, которая зависит от местных физико-географических и циркуляционных условий (Шакина, Скриптунова, 2019). Так, по данным АМСГ (авиационная метеорологическая станция гражданская) за период 2011–2021 гг. (Pustovalov et al., 2024) и данным метеостанций за 1966–2012 гг. (Комаров и др., 2013) в Сибири значения ВНГ, в том числе и кучево-дождевой облачности (*Cb*), увеличиваются с севера на юг.

В настоящее время ВНГ облаков определяется в основном с помощью светолокационных и лидарных измерителей и метеорологических радиолокаторов (Pustovalov et al., 2024). Также информацию о ВНГ облаков можно получать из данных спутникового зондирования атмосферы (Скорыходов, Курьянович, 2022), однако они пока имеют большую погрешность, хотя методы спутникового зондирования ВНГ облаков продолжают развиваться и эта погрешность уменьшается (Скорыходов и др., 2023). Наиболее точные данные о ВНГ облаков представляют современные лидарные облакомеры, используемые в своём большинстве на АМСГ (Ветрова и др., 2013, Doc 8896..., 2009).

Существует несколько методов прогноза ВНГ (Баранов, Солонин, 1981). Однако, как указывается в работе (Кузнецов и др., 2023), оправдываемость большинства этих методов не превышает 75 %. Поэтому продолжают разработки методов с целью увеличения точности и оправдываемости прогнозов (Кузнецов, Первезенцев, 2016).

Информация о характеристиках облачности, и в первую очередь о ВНГ, необходима для увеличения качества и надёжности климатических моделей, уточнения численных методов прогноза погоды, улучшения метеорологического обеспечения безопасности полётов (Чернокульский, 2010). Особую важность имеет информация о характеристиках кучево-дождевых облаков, поскольку с ними связано развитие таких ОМЯ, как грозы, шквалы, град, ливневые осадки, которые могут наносить значительный ущерб народному хозяйству. Однако результатов современных исследований в этом направлении недостаточно для того, чтобы оценить точность спутниковых измерений.

Цель настоящего исследования состоит в сравнительном анализе характеристик кучево-дождевых облаков и связанных с ними метеорологических явлений конвективного происхождения по данным наземных измерений и спутниковым данным с 2013 по 2022 г.

Данные и методика их обработки

Для сравнительного анализа ВНГ кучево-дождевых облаков (ВНГ *Cb*) были использованы данные измерений (в том числе наблюдений за атмосферными явлениями) в двух пунктах наблюдения, расположенных в районе г. Томска (рис. 1, см. с. 309). Один пункт наблюдения — это АМСГ Томска, расположенный в пос. Богашёво (далее АМСГ), другой — Геофизическая обсерватория Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН) (далее ГО). Исследование проводится как за год в целом, так и для летнего сезона в отдельности. Указанные два пункта наблюдений располагаются на небольшом расстоянии друг от друга (~14 км), что позволяет провести сравнительный анализ характеристик облачности без существенных погрешностей, которые могли бы возникнуть из-за неоднородности рельефа, типа подстилающей поверхности и т. д. С этой точки зрения полученная информация с указанных пунктов наблюдения является уникальной.

Данные АМСГ включают информацию о форме облаков, атмосферных явлениях и ВНГ, содержащуюся в сводках METAR (*англ.* METeorological Aerodrome Report) с временным раз-

решением 30 мин (<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>), начиная с 2013 г. На АМСГ измерения ВНГ облаков выполняются с помощью опτικοлокационного измерителя (лидара) Vaisala CL31 (Облакомер..., 2005), использующего импульсный диодный лазер. Диапазон измерений ВНГ составляет 5–7500 м с разрешением 5 или 10 м. Интервал измерений — 2 или 3 с. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ВНГ в диапазоне 0–100 м включительно составляют ± 10 м, относительной погрешности в диапазоне 100–2000 м — ± 10 %. Измерения проводятся круглосуточно.

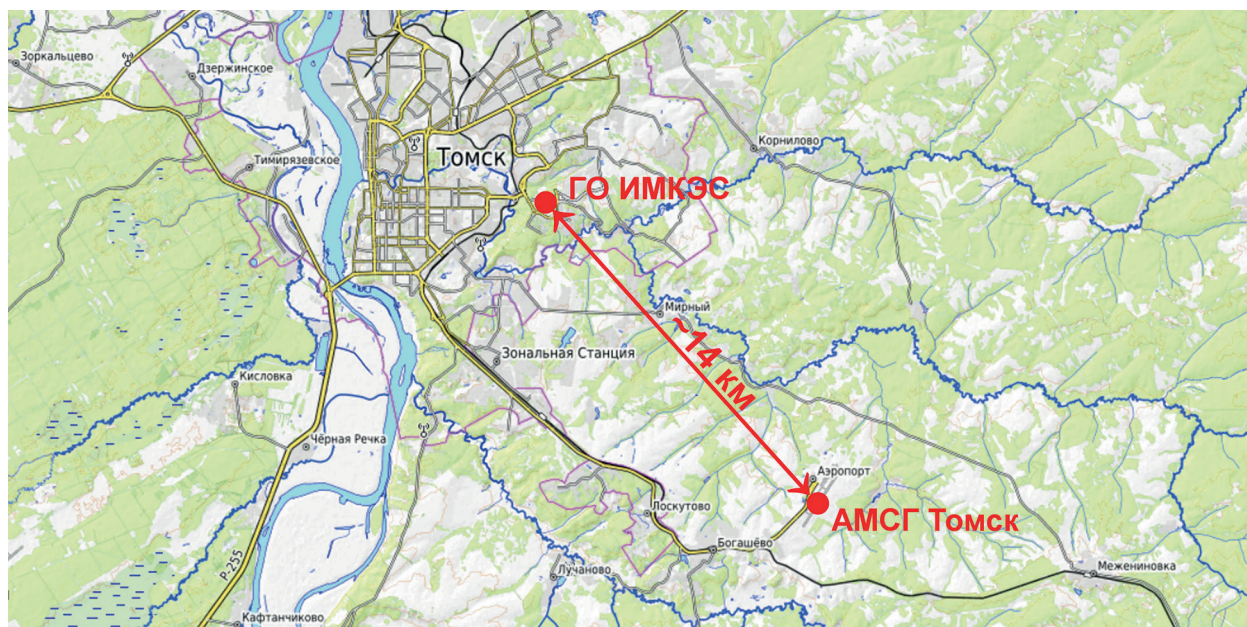


Рис. 1. Пункты наблюдений в районе г. Томска, в которых проводились измерения ВНГ

Были также использованы данные измерений ВНГ облаков в ГО (были начаты в 2008 г.), которые выполняются с помощью светолокационного измерителя РВО-2М (РД 52.04.716-2009..., 2009). Его принцип действия, как и в лидаре, основан на измерении времени прохождения световых импульсов от передатчика до облака и обратно до приёмника и определении вертикального расстояния (высоты) от поверхности до нижней границы облака. Диапазон измерений ВНГ составляет 50–2000 м, пределы допускаемой абсолютной погрешности для высоты 50–150 м равны ± 10 м (минимальная), для высоты более 1500 м составляют ± 150 м (максимальная), среднее время измерения — не более 4–5 с. Измерения ВНГ в ГО проводятся с периодичностью раз в час с 10:00 до 19:00 ч по местному времени.

В настоящей работе для сравнительного анализа были использованы данные измерений высоты нижней границы кучево-дождевой облачности, а также данные наблюдений метеоявлений, которые отмечались при прохождении *Cb*.

Поскольку информация о ВНГ *Cb* в двух пунктах наблюдений охватывает разные периоды наблюдений (с 2013 г. на АМСГ, с 2008 г. в ГО), в данных имеются пропуски, режимы измерений ВНГ различаются (круглосуточные через 30 мин на АМСГ, дневные через 1 ч в ГО), то для сравнительного анализа были отобраны только те данные ВНГ *Cb*, которые одновременно получены в обоих пунктах наблюдений в дневное время суток. На рис. 2 (см. с. 310) представлены годовые и летние выборки данных измерений ВНГ *Cb* на АМСГ и ГО с 2008 по 2022 г. Данные одновременных измерений ВНГ *Cb* в обоих пунктах наблюдений за полный годовой (январь–декабрь) и летний (июнь–август) период имеются только в 2014, 2021 и 2022 гг., за неполный годовой период — в ноябре и декабре 2013 г. и в декабре 2020 г. Всего было отобрано ~5000 значений по данным АМСГ и ~2000 по данным ГО. Именно по выборкам за эти годы и был проведён сравнительный анализ.

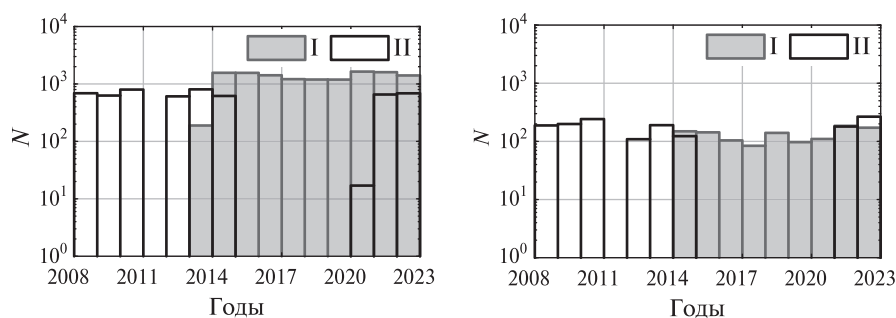


Рис. 2. Количество измерений (N) ВНГ Cb на АМСГ (I) и в ГО (II) в течение года (слева) и летом (справа)

Дополнительно за те же годы привлекалась информация о характеристиках Cb , полученная с помощью процедуры обработки данных дистанционного зондирования атмосферы (спектрорадиометр MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на спутниках Aqua и Terra) на основе самоорганизующихся нейронных сетей (Скороходов, Курьянович, 2022). Всего было отобрано 59 случаев. Для этих случаев были отобраны данные по ВНГ облаков, атмосферным явлениям и метеорологическим величинам на АМСГ и ГО.

На основе регрессионного анализа сравнивались данные о характеристиках Cb (оптическая толщина, радиус частиц, водозапас, коэффициент отражения, эффективная излучательная способность, высота верхней и нижней границ), полученных по данным MODIS, с метеорологическими величинами (температура и влажность воздуха) и сведениями о наличии конвективных явлений при прохождении Cb по данным АМСГ. Значимость полученных оценок определялась по двустороннему t -тесту нулевой гипотезы с $\alpha = 0,05$.

Изменчивость высоты нижней границы кучево-дождевой облачности

Анализ внутригодового хода ВНГ Cb показал, что на АМСГ наименьшие её среднемесячные значения наблюдаются в октябре и ноябре, а наибольшие — в июне и июле (рис. 3), что также было описано в публикации (Pustovalov et al., 2024). Наибольший интерквантильный размах наблюдается в мае, июле и августе. Для ГО в целом сезонный ход подобен сезонному ходу на АМСГ, однако амплитуда изменчивости ВНГ на ГО меньше. Кроме того, на ГО выделяется второй максимум в сентябре.

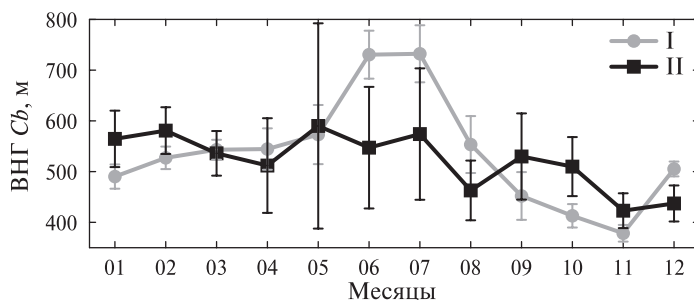


Рис. 3. Внутригодовой ход среднемесячных значений ВНГ Cb в АМСГ (I) и ГО (II)

Далее более подробно рассмотрим особенности изменения ВНГ Cb в летний сезон на фоне среднегодовой изменчивости, поскольку именно летом повышается вероятность развития мощной конвективной облачности и конвективных явлений. На АМСГ в средних за год значениях ВНГ Cb можно выделить два максимума: ~ 300 – 400 и 600 – 800 м (рис. 4, см. с. 311). Летом добавляется максимум на ~ 1000 м. Для значений ВНГ Cb в ГО, так же как и на АМСГ, характерно наличие максимумов на 300 – 400 и 600 – 800 м. При этом для двух пунктов мы получили разные типы распределения: ГО — распределение с правосторонней асимметрией

(преобладают относительно низкие значения ВНГ), АМСГ — многомодовое распределение (выше вероятность возникновения экстремально больших значений ВНГ, особенно летом). Среднегодовая величина ВНГ C_b для обоих пунктов наблюдений совпадает (511 м), а летом её значение в 1,3 раза выше ($\alpha = 0,05$) на АМСГ по сравнению с ГО (табл. 1). Наибольший интерквартильный размах отмечается на АМСГ: для среднегодовых оценок ВНГ C_b — 427 м, а для летнего сезона — 701 м. В ГО соответствующие оценки примерно вдвое ниже. В целом диапазон, в котором изменяются значения ВНГ (как средние, так и экстремально высокие), выше на АМСГ, чем в ГО. Экстремально низкие значения ВНГ выше в ГО, что связано с более развитой конвекцией в условиях городской застройки.

Таблица 1. Статистические характеристики ВНГ C_b для АМСГ Томска и ГО ИМКЭС

Сезон	Пункт	Статистические характеристики, м				
		M	Me	IQR	P_5	P_{95}
Среднее за год	АМСГ Томска	511	488	427	122	1036
	ГО ИМКЭС	511	430	300	230	930
Летний сезон	АМСГ Томска	674	732	701	183	1219
	ГО ИМКЭС	511	415	290	246	1134

Примечание: M — среднее арифметическое значение, Me — медиана, IQR — интерквартильный (межквартильный) размах, P_5 и P_{95} — 5-й и 95-й процентиля.

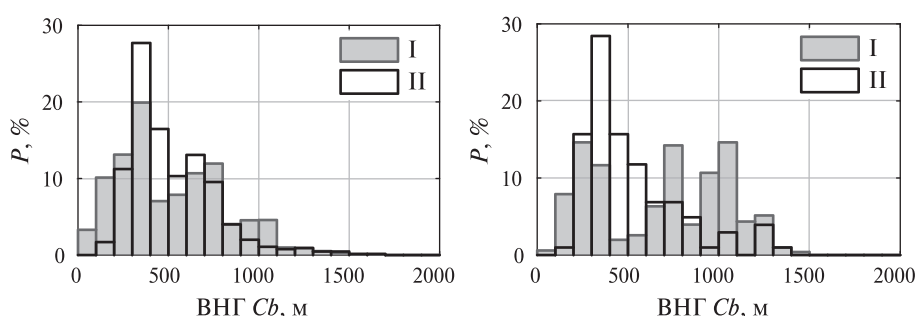


Рис. 4. Гистограммы распределения значений ВНГ C_b в АМСГ (I) и ГО (II) в течение года (слева) и летом (справа)

Выявленные различия в диапазонах изменчивости ВНГ C_b на АМСГ и в ГО частично обусловлены погрешностью измерительных приборов. Кроме того, большое значение имеют характер и масштаб протекающих синоптических процессов. Так, прохождение C_b в некоторый момент времени может быть зафиксировано над одним пунктом измерения, в то время как над другим пунктом оно ещё не наблюдалось, поскольку достигнет его некоторое время спустя. Либо из-за резкой смены циркуляционно-синоптических условий C_b резко меняет свою траекторию, поэтому в одном из пунктов ВНГ может быть не зафиксирована. Возможен также вариант, когда одновременно в двух пунктах проводятся измерения ВНГ, но только один пункт находится под центральной частью облака, а другой — на его периферии, поэтому значения ВНГ могут различаться.

Связь характеристик кучево-дождевой облачности с метеорологическими условиями

Прохождение C_b не всегда сопровождалось наличием неблагоприятных конвективных явлений (они отмечались в ~30 % случаев). По этому признаку мы условно поделили рассматриваемые случаи на две группы, а далее провели сравнительный анализ характеристик C_b для каждой

из них. По данным АМСГ получено, что ВНГ *Cb* при отсутствии явлений значительно выше (около 900 м), чем при их наличии (в частности, ливневых осадков) (рис. 5а). Однако по данным MODIS ситуация наблюдается обратная (рис. 5б), что можно объяснить следующим образом. Когда идут интенсивные осадки, то из-за полос их выпадения, а также из-за наличия разорванных облаков (*Cu Fr* — кучевые разорванные облака, *St Fr* — слоистые разорванные облака), основание *Cb* перестаёт быть плоским. На АМСГ эти полосы регистрируются в нижней части *Cb*, MODIS же фиксирует отражение и излучение облаков. При выпадении осадков эти спектральные особенности облака изменяются, в результате чего значения ВНГ по спутниковым данным могут быть завышены. В этой ситуации можно считать, что данные лазерного зондирования (прямые наземные измерения) и спутникового зондирования взаимно дополняют друг друга, поскольку спутниковые данные предоставляют информацию о характеристиках облачности, которые невозможно измерить с поверхности земли. К таким характеристикам относится, например, высота верхней границы облачности (ВВГ), которая находится в диапазоне 3–4 км (при отсутствии явлений) и может достигать 10–12 км при наличии грозовой деятельности (рис. 5в).

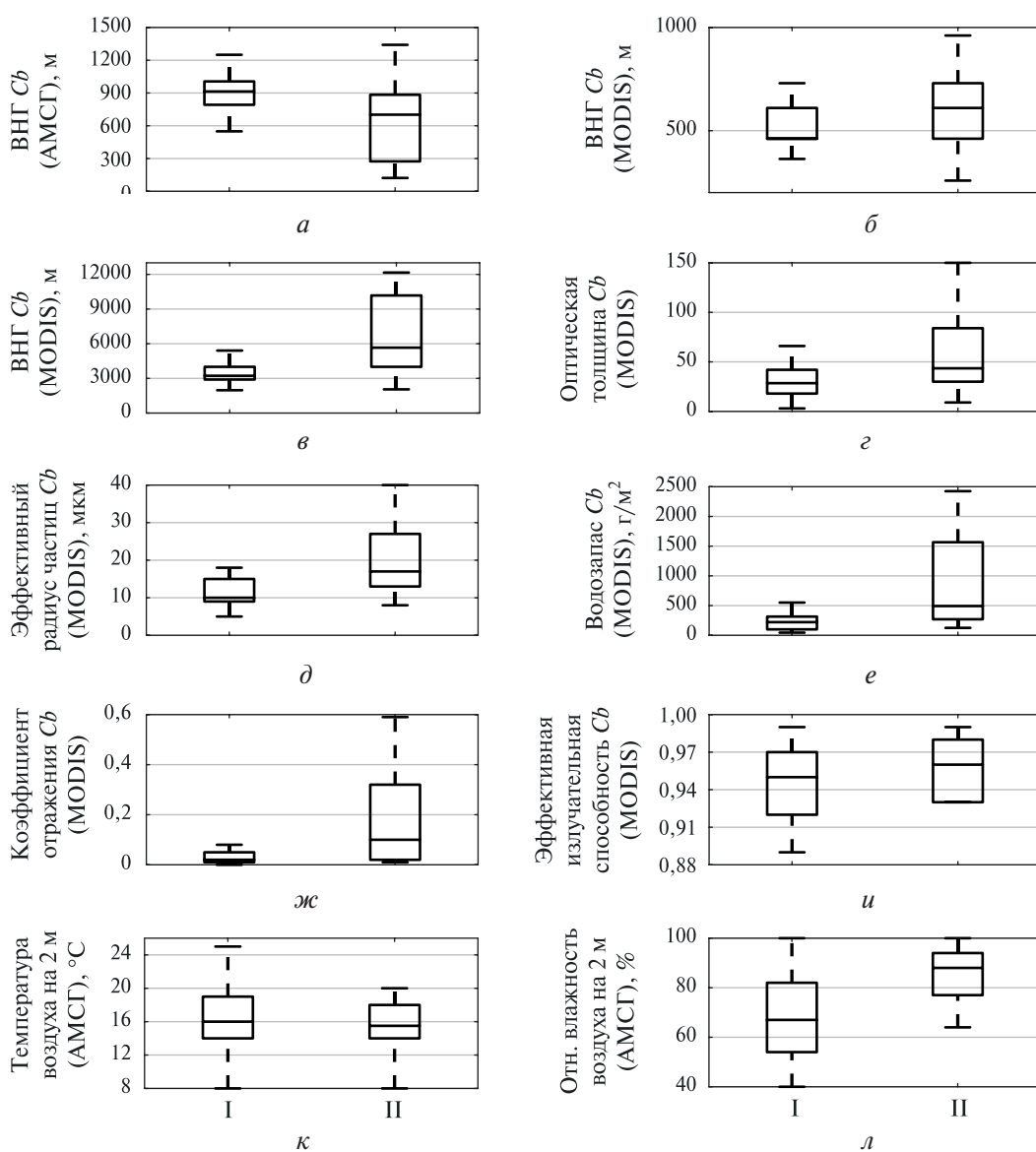


Рис. 5. Характеристики *Cb* (а–и) и метеорологические величины (к, л) при отсутствии осадков (I) и их наличии (ливневый дождь с грозой и без грозы) (II) за летний сезон

Подобные зависимости также характерны для таких характеристик *Cb* облаков, как оптическая толщина (рис. 5г), эффективный радиус частиц (рис. 5д), водозапас (рис. 5е) и коэффициент отражения (рис. 5ж). Все указанные параметры значительно возрастают при грозовой деятельности, которая сопровождается ливневыми осадками. Чем интенсивнее вертикальные потоки, тем крупнее частицы в облаке и больше водозапас и оптическая толща в облаке. Для эффективной излучательной способности в облаке с осадками и без них мы не получили статистически значимых различий (рис. 5и). Также и значения температуры воздуха статистически неразличимы как при отсутствии неблагоприятных явлений, так и при их наличии (рис. 5к). При этом относительная влажность воздуха ожидаемо увеличивается во время наблюдения ливневого дождя (рис. 5л). Большинство из рассмотренных характеристик *Cb* (см. рис. 5а–и) имеют более широкий диапазон изменчивости при наличии ливневого дождя, тогда как диапазон изменений метеовеличин больше при отсутствии атмосферных явлений (см. рис. 5и–л).

Проведённый регрессионный анализ не выявил статистически значимых связей между ВНГ *Cb* по данным MODIS и АМСГ (рис. 6, слева). Далее из рассмотренных 59 случаев с наличием *Cb* мы отобрали семь случаев, когда наблюдались наиболее крупные организованные скопления *Cb* (рис. 7), и провели регрессионный анализ уже для них. Таким образом, коэффициент детерминации возрастает и достигает 0,58 (рис. 6, справа). В последующем анализе мы рассматривали связи только для этих отобранных случаев.

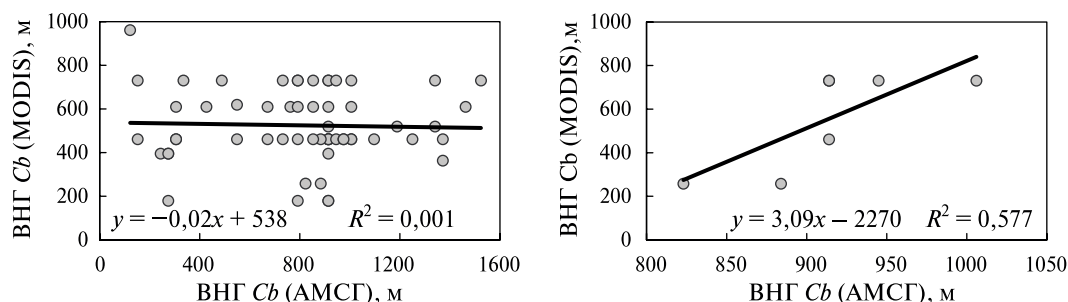


Рис. 6. Связь ВНГ *Cb* по данным АМСГ и MODIS за летний сезон за период 2013–2022 гг. (слева) и для отобранных случаев прохождения мезомасштабных конвективных комплексов (справа)

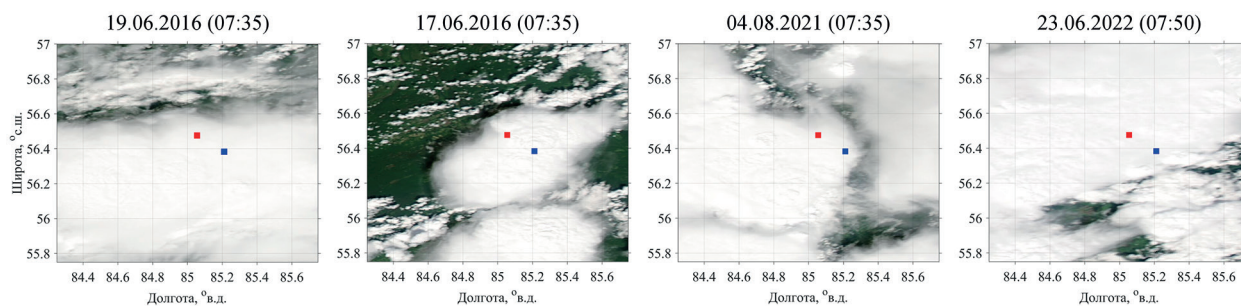


Рис. 7. Примеры спутниковых снимков (MODIS) для отобранных случаев прохождения крупных скоплений *Cb*. Красный квадрат — ГО, синий квадрат — АМСГ

Согласно табл. 2, для случаев с грозой и ливневым дождём (в июне 2020 и 2021 гг.) наблюдается минимальная высота нижней границы облачности и максимальная высота её верхней границы (т.е. наибольшая мощность облака), а также максимальные значения оптической толщи и водозапаса облака, при этом характерны высокие значения коэффициента отражения и эффективной излучательной способности.

В указанных в табл. 2 случаях наблюдалось прохождение скоплений мощных водных *Cb* и была установлена линейная связь ВНГ с водозапасом (0,32) и с оптической толщиной (0,42) и нелинейная с эффективным радиусом — 0,41.

При сравнении ВНГ *Cb* с метеорологическими параметрами установлена нелинейная связь: коэффициент детерминации с температурой воздуха составляет 0,34, с относительной влажностью — 0,83. Согласно работе (Голицын и др., 2006), ВНГ облаков характеризуется высотой, на которой давление пара достигает насыщения при данной температуре (относительная влажность выше 100 %). Чем выше температура воздуха у поверхности, тем выше высота образования облачности. Зависимость ВНГ облаков от относительной влажности, напротив, обратная (Шметер, 1972).

Таблица 2. Характеристики крупных скоплений *Cb*, метеорологические величины и опасные конвективные явления для отобранных случаев

Дата, время (BCV)		03.06.2014, 06:05	19.06.2016, 07:35	25.06.2017, 06:15	26.06.2020, 08:00	17.06.2021, 07:35	04.08.2021, 07:35	23.06.2022, 07:50
τ	MODIS	48	67	30	150	150	57	84
$r_{эфф}$, МКМ		16	24	21	17	27	23	34
P , г/м ³		490	974	386	1566	2425	799	1765
ρ		0,13	0,77	0,59	0,90	0,90	0,81	0,26
ϵ		0,83	0,97	0,96	0,99	0,99	0,98	0,73
ВВГ, м		7100	11 214	10 700	12 156	12 022	10 971	9737
ВНГ, м	MODIS	461	730	730	258	258	730	730
	АМСГ	914	914	914	884	823	1006	945
T , °С	АМСГ	9	21	20	20	18	21	18
f , %		66	64	94	64	77	69	64
Явление		Ливневый дождь	Сухая гроза	Ливневый дождь	Гроза с ливневым дождём		Сухая гроза	Гроза с лив- невым дождём

Примечание: BCV — всемирное скоординированное время, τ — оптическая толщина, $r_{эфф}$ — эффективный радиус частиц, P — водозапас, ρ — коэффициент отражения, ϵ — эффективная излучательная способность, T — температура воздуха, f — относительная влажность воздуха.

В нашем случае сделать подобные однозначные выводы затруднительно из-за небольшой выборки событий, которые следует рассматривать независимо друг от друга. К тому же важно учитывать особенности суточного хода значений ВНГ облаков: утром ВНГ ниже, чем днём (Шметер, 1972). Так, в утренние часы при более высокой влажности конвекция может приводить к образованию *Cu Fr* на очень низком уровне (Селезнева, 1959). В дальнейшем за счёт большего развития конвективных движений эти облака разрушаются и позже образуются вновь уже на больших высотах.

Заключение

Таким образом, был проведён сравнительный анализ характеристик кучево-дождевых облаков и связанных с ними метеорологических явлений конвективного происхождения по данным наземных измерений и спутниковым данным.

Установлено, что максимальные значения высоты нижней границы облачности по наземным базам данных наблюдаются в летние месяцы. При этом диапазон, в котором изменяются значения высоты нижней границы, выше на авиационной метеорологической станции, чем в геофизической обсерватории, что в значительной степени обусловлено влиянием циркуляционно-синоптической ситуации. Средние годовые значения высоты нижней границы облачности в двух пунктах близки, поэтому данные обсерватории в отдельных случаях могут дополнить данные на АМСГ, в случае наличия пропусков.

Показано, что по данным АМСГ высота нижней границы кучево-дождевой облачности при отсутствии неблагоприятных и опасных явлений погоды (гроза, ливневые осадки) выше, чем при их наличии. По данным MODIS ситуация обратная, что обусловлено различиями наземных и спутниковых данных в измерении спектральных характеристик облака при выпадении осадков. Установлено, что связи между характеристиками кучево-дождевой облачности по данным MODIS (высота нижней границы, водозапас, оптическая толщина и эффективный радиус) и АМСГ, включая метеовеличины (высота нижней границы, относительная влажность и температура воздуха), наблюдаются только при прохождении их наиболее крупных организованных скоплений и носят нелинейный характер. Коэффициент детерминации между высотой нижней границы (АМСГ) и характеристиками облачности (MODIS) максимален с эффективным радиусом частицы до $\sim 0,40$. Достаточно высокие оценки связи ($\sim 0,80$) получены между высотой нижней границы (MODIS) и относительной влажностью приземного воздуха (АМСГ). Линейная связь (коэффициент детерминации 0,58) получена только для высоты нижней границы облачности между MODIS и АМСГ. Можно полагать, что эти два набора данных вполне могут взаимно дополнять друг друга, поскольку спутниковые данные предоставляют информацию о характеристиках облачности, которые невозможно измерить с поверхности земли. Выявленные различия в изменении характеристик кучево-дождевой облачности по наземным и спутниковым наблюдениям могут быть обусловлены тем, что в анализе мы не рассматривали особенности рельефа местности, а также влияние процессов атмосферной циркуляции (циклоны/антициклоны, индексы конвективной неустойчивости). В дальнейшем учёт указанных факторов позволит более детально провести анализ полученных результатов.

Полученные в статье выводы могут быть использованы при разработке и тестировании мезомасштабных климатических моделей, а также при уточнении методик прогноза опасных метеорологических явлений, используемых в оперативной практике.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076>) и в рамках госзадания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (№ 121031300154-1).

Литература

1. Баранов А. М., Солонин С. В. Авиационная метеорология. СПб.: Гидрометеиздат, 1981, 186 с.
2. Безрукова А. Н., Чернокульский А. В. Российские исследования облаков и осадков в 2015–2018 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 397–417. <https://doi.org/10.31857/S0002351520040021>.
3. Ветрова Е. И., Скриптунова Е. Н., Шакина Н. П. Режим низкой облачности и её прогноз на аэродромах европейской территории бывшего СССР // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 12–31.
4. Голицын Г. С., Руткевич Б. П., Руткевич П. Б. Нижняя граница облачности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. № 3. С. 263–269.
5. Комаров В. С., Ильин С. Н., Лавриненко А. В., Ломакина Н. Я., Горев Е. В., Нахтигалова Д. П. Климатический режим нижней облачности над территорией Сибири и его современные изменения. Часть 1. Особенности режима нижней облачности // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 07. С. 579–583.
6. Комаров В. С., Матвиенко Г. Г., Ильин С. Н., Ломакина Н. Я. Оценка локальных особенностей долговременного изменения облачного покрова над территорией Сибири с использованием результатов её климатического районирования по режиму общей и нижней облачности // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 1. С. 59–65.
7. Кузнецов И. Е., Первезенцев Р. Е. Методические аспекты восстановления метеорологических полей при комплексном использовании данных радиолокационных и аэросиноптических наблюдений // Навигация и гидрография. 2016. Т. 43. С. 57–63.
8. Кузнецов И. Е., Черепанов Д. В., Насонов А. А., Дорофеев В. В. Прогноз высоты нижней границы облачности в южных районах Приморского края в весенне-летний период // Ученые запи-

- ски Крымского федер. ун-та имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2023. Т. 9(75). № 1. С. 90–99.
9. Облакомер CL31: Руководство пользователя. Vaisala, 2005. 131 с.
 10. РД 52.04.716-2009. Правила эксплуатации метеорологического оборудования аэродромов гражданской авиации. СПб.: ЦНИТ «Астерион», 2009. 128 с.
 11. Селезнева Е. С. О границах и вертикальной мощности конвективных облаков // Тр. Гл. геофиз. обсерватории им. А. И. Воейкова. 1959. № 93. С 3–21.
 12. Скороходов А. В., Курьянович К. В. Использование данных CALIOP для оценки высоты нижней границы облаков на спутниковых снимках MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 43–56. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-43-56>.
 13. Скороходов А. В., Пустовалов К. Н., Харюткина Е. В. и др. Восстановление высоты нижней границы облаков по спутниковым данным MODIS с помощью самоорганизующихся нейронных сетей // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 8. С. 670–680. <https://doi.org/10.15372/AOO20230807>.
 14. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Общее резюме. СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. 124 с.
 15. Чернокульский А. В. Анализ глобального поля облачности и связанных с его вариациями климатических эффектов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2010. 179 с.
 16. Чернокульский А. В., Елисеев А. В., Козлов Ф. А. и др. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 27–41. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2022-5-27-41>.
 17. Шакина Н. П., Скриптунова Е. Н. Режим низкой облачности и прогноз высоты её нижней границы на аэродромах азиатской территории России // Гидрометеорологические исслед. и прогнозы. 2019. № 2(372). С. 59–75.
 18. Шметер С. М. Физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1972, 231 с.
 19. Chernokulsky A. V., Esau I., Bulygina O. N. et al. Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late nineteenth century // J. Climate. 2017. V. 30. No. 6. P. 2103–2120. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0329.1>.
 20. Doc 8896. Руководство по авиационной метеорологии. Монреаль: ICAE, 2009. 177 с.
 21. Han J. Y., Baik J. J., Lee H. Urban impacts on precipitation Asia-Pacific // J. Atmospheric Sciences. 2014. V. 50 (1). P. 17–30. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0016-7>.
 22. IPCC, 2021: Summary for Policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. 2021. 32 p.
 23. Platonov V. S., Varentsov M. I., Yarinich Yu. I. et al. A large mid-latitude city intensifies severe convective events: Evidence from long-term high-resolution simulations // Urban Climate. 2024. V. 54. Article 101837. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101837>.
 24. Pustovalov K. N., Kharyutkina E. V., Moraru E. I. Variability of the Cloud Base Height over the Territory of Western Siberia Based on Laser Sounding Data for the Period 2010–2021 // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. V. 36. P. S41–S50. <https://doi.org/10.1134/S102485602401010X>.
 25. Shepherd J. Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes // J. Arid Environment. 2010. V. 67(4). P. 607–628. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.03.022>.
 26. Vraciu C. V. In what conditions an urban heat island can initiate deep convection? Theoretical estimations // Theoretical and Applied Climatology. 2023. V. 155. P. 567–579. <https://doi.org/10.1007/S00704-023-04652-5/FIGURES/4>.

Comparative analysis of cumulonimbus clouds characteristics based on ground observations and satellite data for Tomsk

E. I. Moraru^{1,2}, E. V. Kharyutkina^{1,3}, K. N. Pustovalov^{1,2,3},
A. V. Skorokhodov², S. V. Smirnov^{1,3}

¹ *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS
Tomsk 634055, Russia
E-mail: moraruei@yandex.ru, kh_ev@mail2000.ru,
const.pv@yandex.ru, smirnov@imces.ru*

² *V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634055, Russia
E-mail: vazime@yandex.ru*

³ *National Research Tomsk State University, Tomsk 634050, Russia*

In the framework of this study, a comparative statistical analysis of cumulonimbus clouds (*Cb*) characteristics was carried out on the basis of ground measurements and satellite data from 2013 to 2022. Related phenomena of convective origin were also taken into account. We used laser sounding data and meteorological measurements from two observational points located in Tomsk. Information about the cumulonimbus clouds characteristics were derived based on the processing procedure of atmospheric remote sensing data (MODIS — Moderate Resolution Spectroradiometer). It was established that relationships between the characteristics based on MODIS (cloud base height, water content, optical depth and effective radius) and CAMS (civil aviation meteorological station), including meteorological parameters (cloud base height, relative humidity and air temperature) are nonlinear; they are observed only during the passage of the largest organized clusters of cumulonimbus. High values of relationship (determination coefficient ~0.80) were derived for cloud base height (satellite data) and relative humidity (ground measurements). A linear relationship (determination coefficient 0.58) was revealed only for cloud base height between satellite and ground-based measurements. Thus, these two data sets can complement each other because satellite data provide information about cloud characteristics that cannot be measured from the ground.

Keywords: cumulonimbus cloudiness, cloud base height, satellite data, ground-based measurements, cloud spectral characteristics, convective phenomena

Accepted: 21.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-307-318

References

1. Baranov A. M., Solonin S. V., *Aviation Meteorology*, Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1981, 186 p. (in Russian).
2. Bezrukova N. A., Chernokulsky A. V., Russian studies on clouds and precipitation in 2015–2018, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, Vol. 56, No. 4, pp. 344–363, DOI: 10.1134/S0001433820040027.
3. Vetrova E. I., Skriptunova E. N., Shakina N. P., Low clouds and their forecast at the airports of the European part of the former USSR, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2013, Vol. 38, pp. 6–19, <https://doi.org/10.3103/S1068373913010020>.
4. Golitsyn G. S., Rutkevich B. P., Rutkevich P. B., Cloud Base Height, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 3, pp. 263–269 (in Russian).
5. Komarov V. S., Il'in S. N., Lavrinenko A. V., Lomakina N. Ya., Gorev E. V., Nakhtigalova D. P., Climate conditions of low clouds over the territory of Siberia and its modern change. Part I. Features of low clouds conditions, *Optika atmosfery i okeana*, 2013, Vol. 26, No. 07, pp. 579–583 (in Russian).
6. Komarov V. S., Matvienko G. G., Il'in S. N., Lomakina N. Ya. Estimate of local features of long-term variations in cloud cover over the territory of Siberia using results of its climatic zoning according to total and low-level cloud regimes, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, Vol. 28, pp. 265–272, <https://doi.org/10.1134/S1024856015030082>.
7. Kuznetsov I. E., Pervezentsev R. E., Methodic aspects of meteorologic fields restoration in complex employment of radiolocation and aerosynoptic observations data, *Navigatsiya i gidrografiya*, 2016, Vol. 43, pp. 57–63 (in Russian).

8. Kuznetsov I. E., Cherepanov D. V., Nasonov A. A., Dorofeev V. V., Forecast of the height of the lower bound of cloud in the southern regions of Primorsky krai in the spring-summer period, *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universitetata imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2023, Vol. 9(75), No. 1, pp. 90–99 (in Russian).
9. *Oblakomer CL31: Rukovodstvo pol'zovatelya* (Vaisala CL31: Operation and User's Manual), Vaisala, 2005, 131 p.
10. RD 52.04.716-2009. *Pravila ekspluatatsii meteorologicheskogo oborudovaniya aerodromov grazhdanskoi aviatsii* (RD 52.04.716-2009 (Rules of operation of meteorological equipment of civil aviation airfields), Saint Petersburg: TsNIT "Asterion", 2009, 128 p. (in Russian).
11. Selezneva E. S., On the boundaries and vertical power of convective clouds, *Trudy Glavnoi geofizicheskoi observatorii im. A. I. Voeikova*, 1959, No. 93, pp. 3–21 (in Russian).
12. Skorokhodov A. V., Kur'yanovich K. V., Using CALIOP data to estimate the cloud base height in MODIS images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 43–56 (in Russian), <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-2-43-56>.
13. Skorokhodov A. V., Pustovalov K. N., Kharyutkina E. V. et al., Cloud-base height retrieval from MODIS satellite data based on self-organizing neural networks, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2023, Vol. 36, pp. 723–734, <https://doi.org/10.1134/S1024856023060209>.
14. *Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii: Obshchee rezyume* (Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary), Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, 124 p. (in Russian).
15. Chernokul'skii A. V., *Analiz global'nogo polya oblachnosti i svyazannykh s ego variatsiyami klimaticheskikh effektoy: Dis. kand. fiz.-mat. nauk.* (Analysis of the global cloud field and climate effects associated with its variations, Cand. phis.-mat. sci.): Moscow, 2010, 179 p. (in Russian).
16. Chernokul'skiy A. V., Eliseev A. V., Kozlov F. A. et al., Atmospheric Severe Convective Events in Russia: Changes Observed from Different Data, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, Vol. 47, pp. 343–354, <https://doi.org/10.3103/S106837392205003X>.
17. Shakina N. P., Skriptunova E. N., Regime of low clouds and ceiling forecasting at the aerodromes in Asian Russia, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2019, No. 2(372), pp. 59–75 (in Russian).
18. Shmeter S. M., *Fizika konvektivnykh oblakov* (Physics of convective clouds), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1972, 231 p. (in Russian).
19. Chernokul'skiy A. V., Esau I., Bulygina O. N. et al., Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late nineteenth century, *J. Climate*, 2017, Vol. 30, No. 6, pp. 2103–2120, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0329.1>.
20. *Doc 8896. Rukovodstvo po aviatsionnoi meteorologii* (Manual of aeronautical meteorological practice), Montreal: ICAE, 2009, 177 p.
21. Han J. Y., Baik J. J., Lee H., Urban impacts on precipitation Asia-Pacific, *J. Atmospheric Sciences*, 2014, Vol. 50(1), pp. 17–30, <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0016-7>.
22. IPCC, 2021: Summary for Policymakers, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. (eds.), 2021, 32 p.
23. Platonov V. S., Varentsov M. I., Yarinich Yu. I. et al., A large mid-latitude city intensifies severe convective events: Evidence from long-term high-resolution simulations, *Urban Climate*, 2024, Vol. 54, Article 101837, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101837>.
24. Pustovalov K. N., Kharyutkina E. V., Moraru E. I., Variability of the cloud base height over the territory of Western Siberia based on laser sounding data for the period 2010–2021, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2024, Vol. 36, pp. S41–S50, <https://doi.org/10.1134/S102485602401010X>.
25. Shepherd J., Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes, *J. Arid Environment*, 2010. Vol. 67 (4), pp. 607–628, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.03.022>.
26. Vraciu C. V., In what conditions an urban heat island can initiate deep convection? Theoretical estimations, *Theoretical and Applied Climatology*, 2023, Vol. 155, pp. 567–579, <https://doi.org/10.1007/S00704-023-04652-5/FIGURES/4>.