

УДК 551.576.4

## Изменчивость высоты нижней границы облачности над территорией Западной Сибири по данным лазерного зондирования за период 2010–2021 гг.

К.Н. Пустовалов<sup>1,2,3</sup>, Е.В. Харюткина<sup>✉1</sup>, Е.И. Морару<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

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

<sup>3</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 27.03.2023 г.;

после доработки 10.05.2023 г.;

принята к печати 6.06.2023 г.

По данным лазерного зондирования проведен анализ изменения высоты нижней границы (ВНГ) облачности нижнего яруса и кучево-дождевых облаков в Западной Сибири за 2010–2021 гг. Установлено, что в целом происходит уменьшение ВНГ нижней облачности и увеличение ВНГ кучево-дождевых облаков. Увеличение значений ВНГ нижней облачности происходит с севера на юг. В распределении высоты кучево-дождевой облачности прослеживается более меридиональный характер. Сезонный ход ВНГ нижней и кучево-дождевой облачности на юге территории имеет максимум в летние месяцы. В центре и на севере наблюдаются два максимума: для нижней облачности — летом и весной, а для кучево-дождевой облачности — зимой и летом. Результаты кластерного анализа показали, что ВНГ кучево-дождевых облаков, измеренная на разных станциях, сильно различается. Это, предположительно, обусловлено характером подстилающей поверхности, а также региональными особенностями атмосферной циркуляции и конвективных процессов.

**Ключевые слова:** высота нижней границы облаков, нижняя облачность, кучево-дождевая облачность, лазерное зондирование атмосферы, Западная Сибирь; cloud base height, lower cloudiness, cumulonimbus clouds, laser sounding data, Western Siberia.

### Введение

Глобальное потепление, наблюдающееся в последние десятилетия [1, 2], может привести к увеличению влагосодержания атмосферы [3], интенсификации атмосферной конвекции и, следовательно, к усилению опасных конвективных явлений [4]. На территории России за период 1966–2020 гг. наблюдается увеличение кучево-дождевой (*Cb*) и уменьшение слоисто-дождевой облачности [4, 5]. Увеличение вклада конвективной облачности в общую облачность наблюдается весной, а облаков верхнего яруса — летом [5]. Над территорией Сибири по данным метеостанций за период 1976–2005 гг., соответствующий интенсивному росту глобальной температуры, почти повсеместно отмечалось увеличение общей и нижней облачности, а при замедлении потепления в 2006–2013 гг., напротив — уменьшение этих параметров, особенно весной и зимой [6].

На юге региона отмечается также увеличение *Cb* облачности [4]. В полярных широтах (Норвежское, Баренцево и Карское моря) тенденции изменения облачности различаются: наблюдаются уменьшение количества облаков в середине XX в. и увеличение в последние десятилетия [7], что, согласно [8], может быть связано с ростом повторяемости конвективной облачности.

Согласно [5] к середине XXI в. ожидается усиление негативных климатических воздействий и экстремальности климата, в том числе связанных с конвекцией [17]. По этой причине исследование изменчивости характеристик облачности в Западно-Сибирском регионе является актуальным.

Одна из важных характеристик облачности, в том числе конвективной — высота ее нижней границы (ВНГ), которая меняется в зависимости от физико-географических и циркуляционных условий региона [9]. Для определения ВНГ облаков используют следующие наземные методы: инструментальные (оптический измеритель высоты облаков, лазерный измеритель высоты облаков, метеорологический радиолокатор и др.), инструментально-визуальные

\* Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru); Елена Валерьевна Харюткина (kh\_ev@mail2000); Евгения Ивановна Морару (MoraruEI@yandex.ru).

(потолочный прожектор, шар-пилот, воздушное судно), расчетные (данные радиозондирования атмосферы или измерения метеорологических параметров у земли) и визуальные (например, при количестве облаков менее 5–6 баллов, при интенсивных осадках) [10, 11]. Также информацию о ВНГ облаков можно получить из данных спутникового мониторинга [12], однако это весьма сложно. В связи с этим в настоящее время основными методами получения информации о ВНГ облачности по-прежнему остаются дистанционные измерения с поверхности земли.

В работе [13] по данным метеостанций показано, что за период 1966–2012 гг. в Сибири значения среднезональной ВНГ облаков нижнего яруса увеличиваются от полярных широт к умеренным. При этом максимальные значения наблюдаются на юге Западной Сибири, в центральной части Якутии и в Забайкалье, что обусловлено повышением здесь повторяемости конвективных облаков. Согласно [14], в 1969–2013 гг. зимой в Сибири преобладали низкие значения ВНГ облаков нижнего яруса, а летом, напротив, высота максимальна и хорошо выражено ее зональное распределение с минимумом в полярных районах и максимумом на юге Сибири.

Наиболее точные измерения с высоким временным разрешением ВНГ облачности проводятся на авиационных метеорологических станциях гражданских (АМСГ) с помощью лазерных облакомеров (лидаров), что обусловлено важностью этой информации для авиации [11, 15]. В работе [9] на основе данных наблюдений на АМСГ в коде METAR (METeoro logical Aerodrome Report) показано, что в азиатской части России наиболее «безоблачным» является аэродром Чита, а самая высокая повторяемость низкой облачности зафиксирована на аэродроме Тикси. Установлено, что наибольшая повторяемость низкой облачности в северных регионах Азии, Западной Сибири и Средней Азии наблюдается в осенне-зимний период (с августа по октябрь – Норильск и Норюнгри, с октября по ноябрь – Нижневартовск, Улан-Удэ).

Информация о характеристиках облачности, особенно облаков вертикального развития, необходима для создания надежных моделей климата, уточнения численных прогнозов погоды и обеспечения безопасности полетов воздушных судов [16]. Особую важность имеют данные о характеристиках кучево-дождевых облаков, поскольку с ними связано развитие таких неблагоприятных и опасных конвективных явлений, как грозы, смерчи, шквалы, град, ливневые осадки и другие, которые наносят значительный ущерб народному хозяйству. На территории большинства областей Западной Сибири преобладают явления, связанные с ветром, а также гидрологические явления [5].

Цель настоящей работы – анализ изменения ВНГ облачности нижнего яруса и кучево-дождевых облаков над территорией Западной Сибири за 2010–2021 гг. по данным дистанционного лазерного зондирования.

## Объект и методы исследования

Исследование проводилось в 2010–2021 гг. на территории Западной Сибири (ЗС) (50–70° с.ш., 60–95° в.д.), которая включает в себя Западно-Сибирскую равнину, а также северную часть Казахстана.

В качестве исходных данных используется информация о ВНГ нижней и кучево-дождевой облачности с АМСГ, распространяемая в составе сводок METAR, с временным разрешением 30 мин, причем только с тех станций, для которых на сервере Iowa State University [18] имеется информация как минимум за один полный год. Всего в исследование включены данные с 26 АМСГ (рис. 1, цв. вкладка). Типы растительности определены по спутниковым данным MODIS Land Cover Type Product (MCD12Q1) (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

Большинство указанных АМСГ представляют среднемесячные оценки ВНГ облачности за 12-летний временной интервал с 2010 по 2021 г. (временной ряд содержит от 125 до 144 значений). На некоторых АМСГ (Кокшетау, Новосибирск, Томск, Семей, Норильск и Салехард) встречаются пропуски в рядах (временной ряд содержит от 43 до 103 значений). На станциях, расположенных в северной части Западной Сибири (Игарка, Надым, Новый Уренгой), временные ряды наиболее короткие (за 4–5 лет измерений получено 24–25 значений), поэтому оценки трендов ВНГ облачности для указанных станций в дальнейшем не анализируются. Внутри года измерения распределяются равномерно: если измерения проводились, то регулярно в течение всего года; если измерения не проводились, то, как правило, также в течение года, и тогда год исключается из анализа.

Коэффициентов линейных трендов рассчитывались только для временных рядов длиной 7–12 лет. Более короткие временные ряды исключались из анализа, тренды для соответствующих станций (например, Игарка, Новокузнецк, Надым, Новый Уренгой) не рассматривались.

Высота нижней границы облачности на АМСГ измеряется с помощью лазерного облакомера CL31 (Vaisala), который предоставляет информацию о трех слоях облачности в диапазоне высот 5–7500 м с разрешением 5 или 10 м [19]. Основным элементом облакомера CL31 является лазер (InGaAs, 910 нм), который посылает короткие импульсы в вертикальном направлении. На основе вертикального профиля обратного рассеяния, вызванного облачностью и осадками, определяется самый нижний край (слой) облачности, а по времени задержки между отправкой и приемом лазерного импульса – его высота.

К нижней облачности мы относили облака нижнего яруса (слоистые, слоисто-кучевые и слоисто-дождевые) и облака вертикального развития (кучевые и кучево-дождевые). Для кучево-дождевых облаков ВНГ определялась следующим образом:

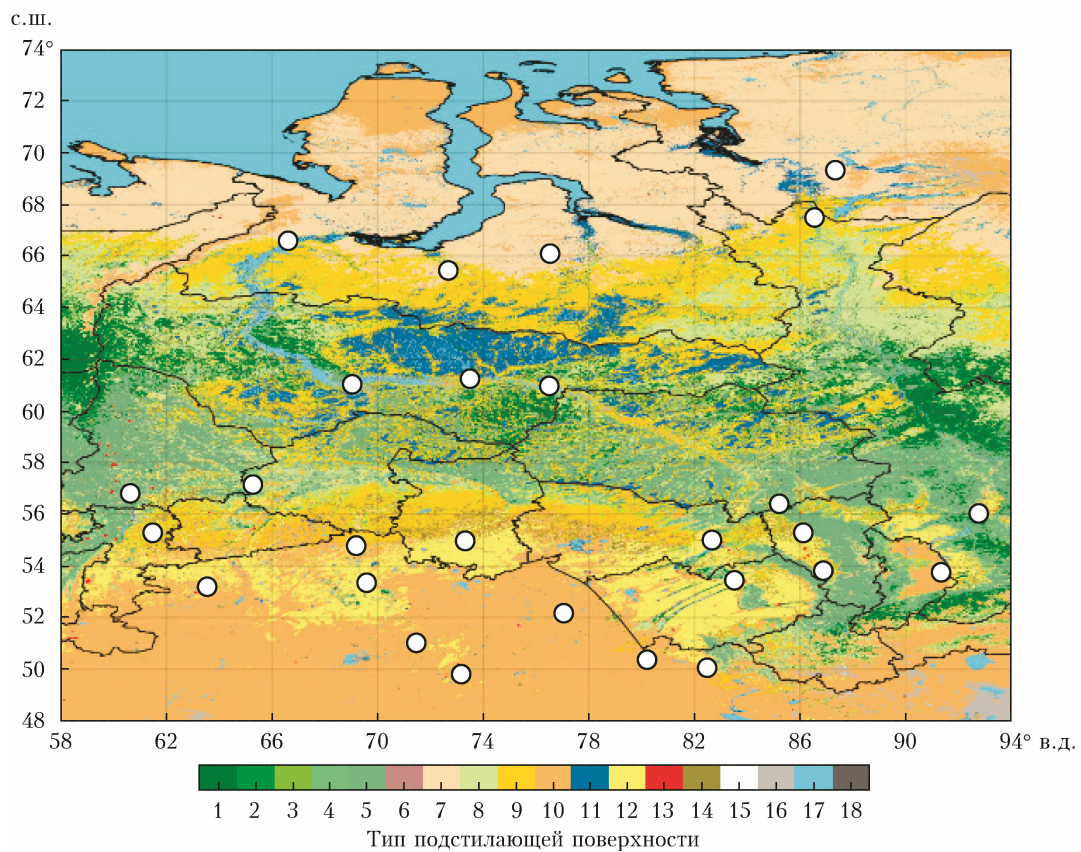


Рис. 1. Расположение АМСГ (белые круги) в Западной Сибири с учетом типа подстилающей поверхности (цветовая шкала): 1 – вечнозеленые хвойные леса; 2 – вечнозеленые лиственные леса; 3 – листопадные хвойные леса; 4 – листопадные лиственные леса; 5 – смешанные леса; 6 – сомкнутые заросли кустарников; 7 – открытые заросли кустарников; 8 – лесостепи; 9 – степи; 10 – луга; 11 – постоянные водно-болотные угодья; 12 – возделываемые земли; 13 – городские и застроенные земли; 14 – естественная растительность; 15 – постоянный снег и лед; 16 – бесплодные земли; 17 – водоемы; 18 – неклассифицированные

если в момент измерения отмечалось наличие таких атмосферных явлений, как гроза, ливневый дождь или снег, крупа или град, которые обусловлены только *Cb*, за значения ВНГ кучево-дождевых облаков принимались значения ВНГ нижней облачности. Однако в некоторых случаях, когда облака нижнего яруса и вертикального развития отсутствуют, но над облакомером CL31 имеются относительно плотные облака среднего (высококучевые, высокостроистые) или верхнего (перисто-слоистые, перисто-кучевые, перистые) ярусов, то в качестве первого уровня может приниматься самый нижний слой облаков одной из этих форм. Таким образом, полученные оценки ВНГ облачности представляют собой медианы высоты основания всех указанных выше форм облачности.

Для отобранных значений производился дескриптивный, регрессионный и кластерный анализы. Кластерный анализ заключается в агломеративной иерархической кластеризации АМСГ на основе сезонного хода ВНГ нижней облачности и *Cb*. Применялся метод невзвешенного попарного среднего (UPGMA) и метод взвешенного попарного среднего (WPGMA). На основе результатов анализа были созданы графики-дендрограммы, изображающие взаимные связи между АМСГ, а также выделяющие группы (классы) с сильной (70% от максимальной и более) связью между станциями.

Интерполяция данных ВНГ облачности на территории ЗС выполнялась посредством функций *meshgrid* и *griddata* в среде программирования MATLAB (The MathWorks, Inc.). Изначально задавались географические координаты узлов регулярной сетки с определенным шагом (1° по широте и долготе), далее производился расчет интерполированных значений ВНГ облачности по данным измерений на АМСГ в узлах заданной сетки. В качестве метода интерполяции был выбран метод естественных соседей (*natural*), который является оптимальным для интерполяции геофизических величин [20].

Обработка и анализ данных выполнялись в среде программирования MATLAB. Статистическая значимость полученных оценок определялась по двустороннему *t*-тесту нулевой гипотезы с  $\alpha = 0,05$ .

## Результаты и обсуждение

Анализ пространственного распределения ВНГ облачности над ЗС показал, что в целом ее увеличение происходит с севера на юг (рис. 2, *a, в, д, ж*). Этот вывод можно объяснить широтным ходом температуры и относительной влажности воздуха: с увеличением влажности воздуха (в полярных районах ее значения выше) происходит понижение границы облачности [21]. Однако можно отметить следующие сезонные особенности. Зимой выделяются области с минимальной высотой, расположенные на западе и северо-востоке (рис. 2, *a*), и области с максимальной высотой на юго-востоке (у подножия Алтайских гор) региона.

Весной и летом, помимо области максимума на юге, наибольшие значения отмечаются и вблизи

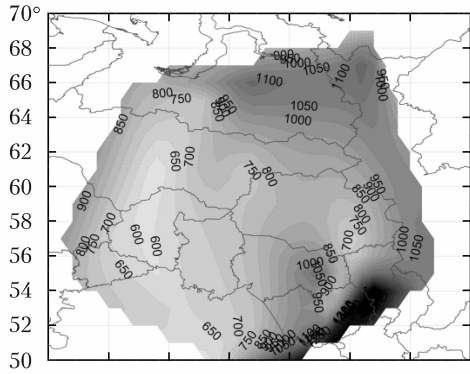
Ханты-Мансийска (рис. 2, *в, д*). Осенью наблюдаются самые низкие значения ВНГ облаков, которые занимают более обширные, по сравнению с другими сезонами, области (рис. 2, *ж*). Подобное распределение в этот сезон характерно и для ВНГ кучево-дождевой облачности (рис. 2, *з*). В остальные сезоны подобие не отмечается. Стоит также отметить меридиональный характер в распределении ВНГ *Cb*: области с минимальной высотой находятся в западной (восточная периферия Уральских гор) и восточной (вблизи побережья Карского моря) частях ЗС, а с максимальной – в южной ее части (рис. 2, *б, з, е*). Максимум на юге региона частично может быть связан с краевым эффектом при интерполяции, однако он не является определяющим, поскольку в южной части территории больше станций, чем в северной, т.е. в расчетах используется большее количество значений. К тому же пространственное распределение на рис. 2 представлено для территории 60–90° в.д., т.е. туда не вошли станции, которые расположены восточнее (Красноярск, Абакан) указанных границ, однако их значения учитывались при интерполяции. На характеристики нижней и конвективной облачности большое влияние оказывают орографические условия (вследствие как тепловых влияний, связанных с перегревом и охлаждением склонов, так и динамического воздействия склонов). При этом даже перепад высот около 50 м может быть существенным для изменения ВНГ [22].

Во все сезоны года наблюдается прямо пропорциональная зависимость между ВНГ и высотой расположения станций. Летом и осенью сезоны коэффициентов корреляции (*r*) для кучево-дождевой облачности выше, чем в другие сезоны (*r* = 0,54 летом). Наименьшие оценки *r* характерны для зимы.

Максимальные среднегодовые значения ВНГ облаков нижнего яруса наблюдаются на юге ЗС – в Восточном Казахстане на ст. Усть-Каменогорск (1220 м) и Семей (1220 м) (табл. 1). Вероятно, это связано с тем, что станции расположены в степных районах (см. рис. 1), где из-за значительного прогрева поверхности может наблюдаться высокий уровень конвекции. С другой стороны, здесь вносит вклад адвекция сухого воздуха из южной части Казахстана. Минимальная высота, напротив, наблюдается на севере ЗС – на ст. Игарка (490 м) и Норильск (400 м), расположенных на переувлажненных территориях (см. рис. 1).

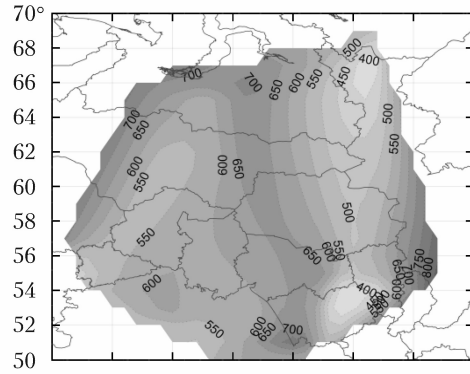
На значения ВНГ облаков нижнего яруса сильно влияет также относительная влажность воздуха: в арктических районах она выше, чем в степных. Подобные выводы справедливы и для *Cb*, за исключением ст. Усть-Каменогорск (табл. 2). Стоит отметить, что значения ВНГ нижней облачности в целом превышают ВНГ *Cb*. Это согласуется с результатами [9], где отмечается высокая повторяемость низких облаков для ряда аэродромов при сильных (> 8 м/с) ветрах, которые связаны с прохождением кучево-дождевой облачности.

с. III.

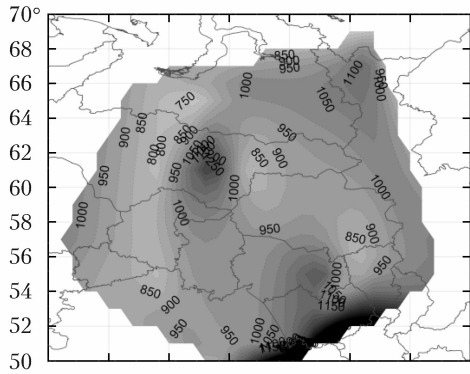


*a*

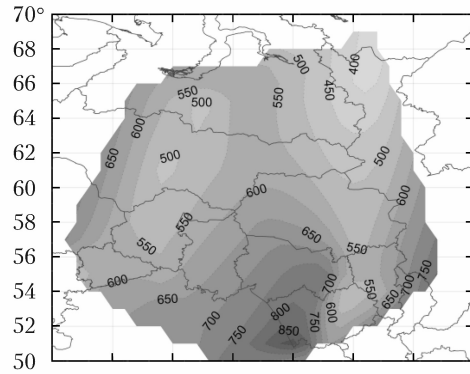
с. III.



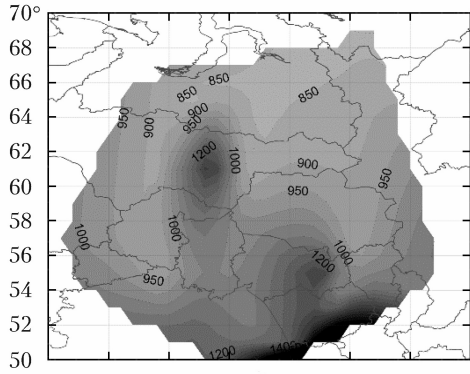
*б*



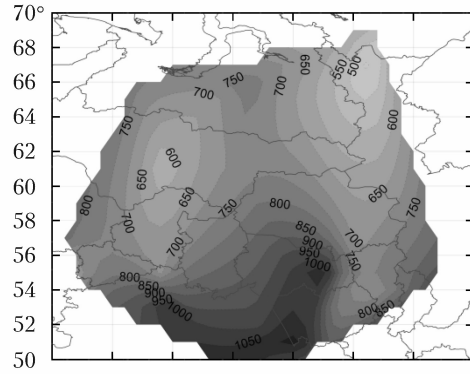
*в*



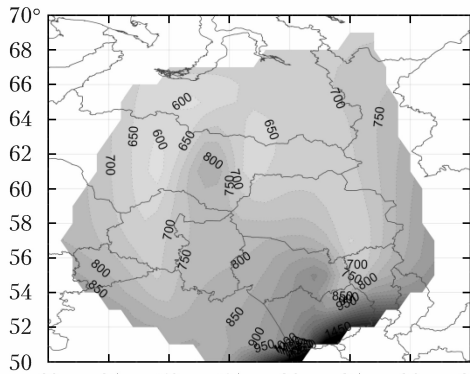
*г*



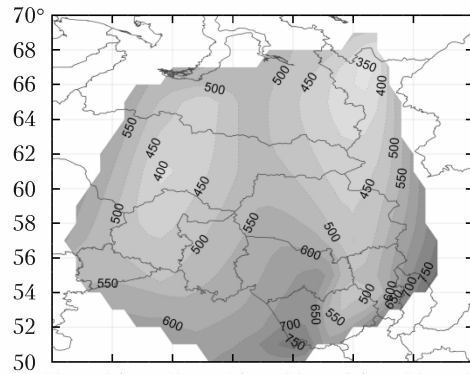
*д*



*е*



*ж*



*з*

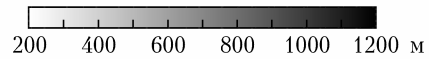
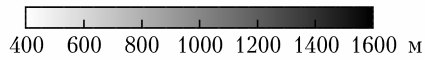


Рис. 2. Пространственное распределение ВНГ нижней (слева) и кучево-дождевой (справа) облачности над Западной Сибирью в 2010–2021 гг.: *a, б* – зима; *в, г* – весна; *д, е* – лето; *ж, з* – осень

Таблица 1

**Статистические характеристики среднегодовых значений ВНГ нижней облачности на АМСГ  
Западной Сибири за 2010–2021 гг.**

| АМСГ             | Медиана, м | 0,25-квантиль, м | 0,75-квантиль, м | Тренды,<br>м/год | Абсолютная высота<br>станции н.у.м., м |
|------------------|------------|------------------|------------------|------------------|--|
| Астана           | 610        | 270              | 1220             | <b>-8,06</b>     | 355                                    |
| Кокшетау         | 670        | 310              | 1220             | -15,50           | 274                                    |
| Петропавловск    | 790        | 340              | 1010             | -10,70           | 142                                    |
| Караганда        | 700        | 310              | 1310             | -0,37            | 538                                    |
| Усть-Каменогорск | 1220       | 790              | 3050             | <b>-68,70</b>    | 286                                    |
| Павлодар         | 1010       | 490              | 1220             | 6,71             | 125                                    |
| Семей            | 1220       | 790              | 1310             | -8,17            | 210                                    |
| Костанай         | 980        | 340              | 1160             | -4,10            | 182                                    |
| Абакан           | 910        | 520              | 1130             | -17,60           | 245                                    |
| Барнаул          | 910        | 340              | 1220             | -27,40           | 255                                    |
| Кемерово         | 700        | 370              | 1010             | -41,20           | 261                                    |
| Красноярск       | 1010       | 760              | 1220             | -10,10           | 276                                    |
| Новосибирск      | 880        | 460              | 1340             | <b>-124,00</b>   | 111                                    |
| Томск            | 670        | 310              | 1010             | 5,39             | 178                                    |
| Новокузнецк      | 790        | 400              | 1010             | —                | 308                                    |
| Игарка           | 490        | 310              | 910              | —                | 31                                     |
| Норильск         | 400        | 210              | 880              | -20,70           | 175                                    |
| Челябинск        | 910        | 490              | 1220             | <b>-26,10</b>    | 234                                    |
| Салехард         | 760        | 310              | 1100             | -21,20           | 67                                     |
| Ханты-Мансийск   | 610        | 270              | 1010             | 4,99             | 23                                     |
| Надым            | 520        | 310              | 910              | —                | 15                                     |
| Новый Уренгой    | 610        | 240              | 1010             | —                | 59                                     |
| Нижневартовск    | 610        | 310              | 910              | <b>-28,10</b>    | 54                                     |
| Сургут           | 640        | 270              | 1220             | <b>-136,00</b>   | 44                                     |
| Екатеринбург     | 790        | 430              | 1220             | <b>-42,80</b>    | 233                                    |
| Тюмень           | 790        | 340              | 1220             | 0,15             | 115                                    |

Примечание. Здесь и далее полужирным выделены статистически значимые оценки  $\alpha = 0,05$ .

Таблица 2

**Статистические характеристики среднегодовых значений ВНГ кучево-дождевой облачности на АМСГ  
Западной Сибири за 2010–2021 гг.**

| АМСГ             | Медиана, м | 0,25-квантиль, м | 0,75-квантиль, м | Тренды,<br>м/год | Абсолютная высота<br>станции н.у.м., м |
|------------------|------------|------------------|------------------|------------------|--|
| Астана           | 700        | 340              | 1220             | -13,40           | 355                                    |
| Кокшетау         | 550        | 310              | 1070             | 1,62             | 274                                    |
| Петропавловск    | 460        | 270              | 910              | <b>13,30</b>     | 142                                    |
| Караганда        | 610        | 310              | 1130             | -9,76            | 538                                    |
| Усть-Каменогорск | 700        | 370              | 1010             | -13,30           | 286                                    |
| Павлодар         | 700        | 370              | 1010             | 4,88             | 125                                    |
| Семей            | 1070       | 760              | 1220             | 9,39             | 210                                    |
| Костанай         | 520        | 240              | 1010             | 12,50            | 182                                    |
| Абакан           | 910        | 640              | 1160             | <b>46,50</b>     | 245                                    |
| Барнаул          | 310        | 180              | 700              | <b>-17,50</b>    | 255                                    |
| Кемерово         | 490        | 310              | 790              | <b>34,70</b>     | 261                                    |
| Красноярск       | 880        | 640              | 1040             | <b>12,90</b>     | 276                                    |
| Новосибирск      | 700        | 370              | 1130             | 3,35             | 111                                    |
| Томск            | 400        | 240              | 670              | <b>35,70</b>     | 178                                    |
| Новокузнецк      | 370        | 240              | 490              | —                | 308                                    |
| Игарка           | 310        | 210              | 400              | —                | 31                                     |
| Норильск         | 310        | 180              | 550              | 45,70            | 175                                    |
| Челябинск        | 370        | 240              | 610              | 5,63             | 234                                    |
| Салехард         | 610        | 310              | 1010             | <b>18,70</b>     | 67                                     |
| Ханты-Мансийск   | 340        | 210              | 610              | <b>27,80</b>     | 23                                     |
| Надым            | 490        | 340              | 700              | —                | 15                                     |
| Новый Уренгой    | 610        | 340              | 910              | —                | 59                                     |
| Нижневартовск    | 610        | 340              | 910              | 1,40             | 54                                     |
| Сургут           | 460        | 240              | 790              | 4,21             | 44                                     |
| Екатеринбург     | 610        | 340              | 1010             | <b>11,30</b>     | 233                                    |
| Тюмень           | 430        | 240              | 760              | <b>9,88</b>      | 115                                    |

На ст. Усть-Каменогорск отмечается самый большой среди всех рассматриваемых станций интерквартильный размах (что говорит о значительной изменчивости величины) ВНГ нижней облачности (2260 м), тогда как на ст. Семей он составляет 520 м, что близко к минимальному значению (460 м), полученному для Новосибирска. Максимальный интерквартильный размах ВНГ *Cb* наблюдается на ст. Караганда – 820 м, минимальный – в Игарке (190 м).

За период 2010–2021 гг. на территории ЗС произошло уменьшение ВНГ нижней облачности. Максимальные отрицательные оценки трендов, полученные для ст. Сургут (–136 м/год) и Новосибирск (–124 м/год), являются статистически значимыми, при этом они почти на порядок превышают соответствующие оценки на других станциях. Временные ряды здесь не содержат пропусков за исследуемый интервал, что говорит о достаточной статистической обеспеченности полученных оценок. Статистически значимые оценки отрицательных трендов также получены для станций, расположенных преимущественно в юго-западных и юго-восточных частях ЗС.

Высота нижней границы кучево-дождевой облачности, напротив, в большинстве районов ЗС увеличивается: максимальный тренд отмечается на ст. Абакан (46,5 м/год) в степной зоне. Уменьшение ВНГ *Cb* происходит в Барнауле – в лесостепной зоне (–17,5 м/год) (см. табл. 2). Тенденция к увеличению ВНГ наблюдается преимущественно на юге территории, но в отличие от ВНГ нижней облачности, значимые положительные тренды ВНГ *Cb* отмечаются и в арктической зоне ЗС (выше 60° с.ш.).

Однако встречаются и исключения, как, например, сезонный ход ВНГ нижней облачности на ст. Усть-Каменогорск, когда максимумы приходятся на переходные сезоны. Для станций в центральной части ЗС (где преобладают лесные и болотные ландшафты) в сезонном ходе прослеживаются два максимума: для нижней облачности – летом и весной (последний менее выражен), а для *Cb* – зимой и летом (например, Нижневартовск, Ханты-Мансийск) (рис. 3). Для станций за Северным полярным кругом (где преобладает зона тундры) также хорошо прослеживаются два максимума (зимой и летом) в сезонном ходе ВНГ *Cb* (например, Салехард

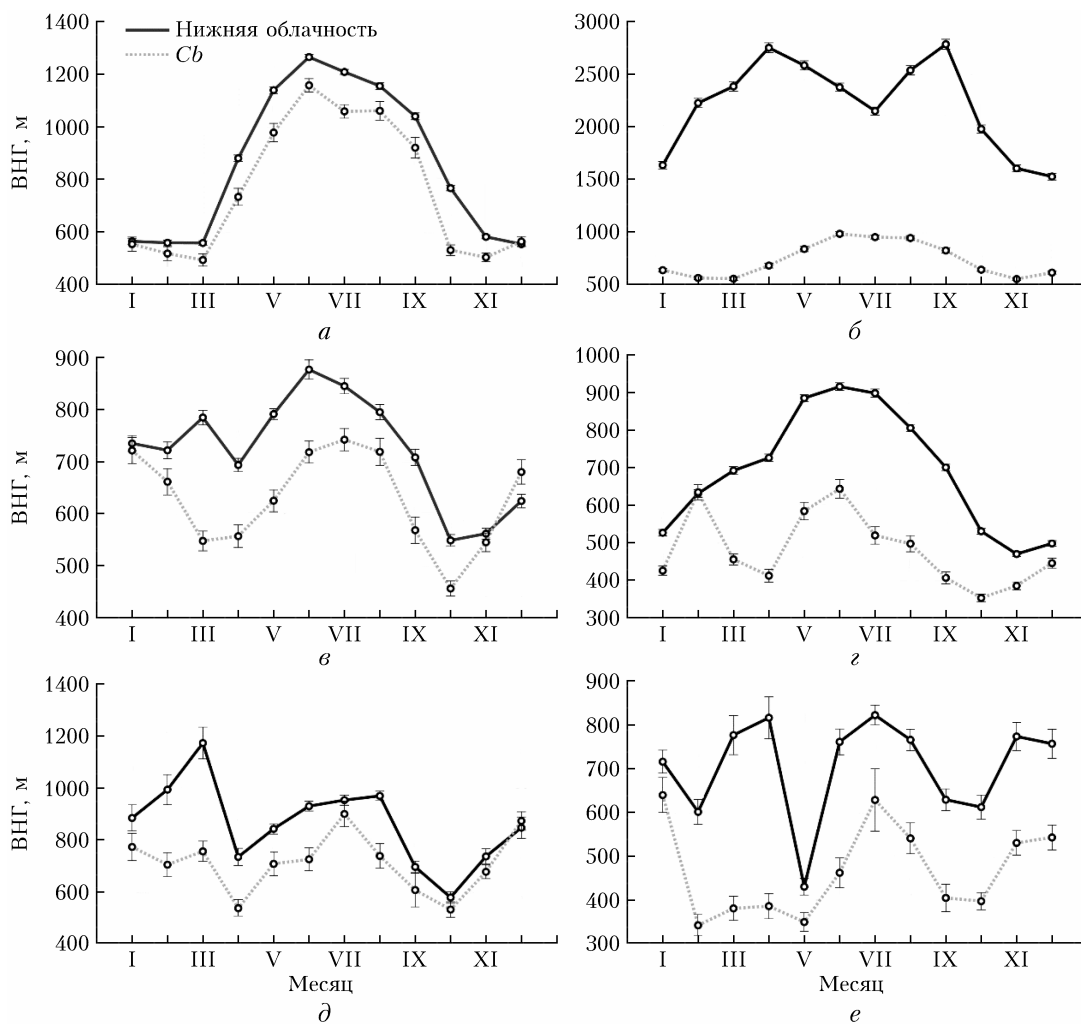


Рис. 3. Сезонная изменчивость ВНГ облаков за 2010–2021 гг.: а – ст. Караганда; б – Усть-Каменогорск; в – Нижневартовск; г – Ханты-Мансийск; д – Салехард; е – Норильск

и Норильск). При этом для ВНГ нижней облачности, как правило, наблюдается еще и весенний максимум (рис. 3).

В целом для ВНГ нижней облачности было выделено две группы АМСГ: к первой относится только ст. Усть-Каменогорск, а ко второй – все остальные АМСГ.

Анализ сезонной изменчивости оценок ВНГ облаков показал, что в южной части исследуемого региона максимальные значения наблюдаются в основном в летние месяцы. Особенно это характерно для наиболее возвышенных станций (например, Караганда – 538 м) (см. рис. 3). На основе внутригодового хода кучево-дождевой облачности выделено четыре группы по методу невзвешенного попарного среднего (UPGMA) и две группы – по методу взвешенного попарного среднего (WPGMA) (рис. 4).

К первой группе относятся станции, расположенные главным образом в южной и центральной частях ЗС (исключения – Игарка и Норильск), а ко второй группе – станции на территории Казахстана, на севере ЗС, а также в предгорных районах на западе и востоке региона (исключение – Новосибирск). При использовании метода UPGMA вторая группа разделяется еще на три подгруппы, первая из которых представлена станциями в Казахстане и ст. Новосибирск, вторая – станциями на севере ЗС и ст. Екатеринбург, третья – станциями в верхнем течении р. Енисей и ст. Семей.

Таким образом, на всех АМСГ (кроме ст. Усть-Каменогорск) отмечается подобный внутригодовой ход ВНГ нижней облачности в целом, в то время

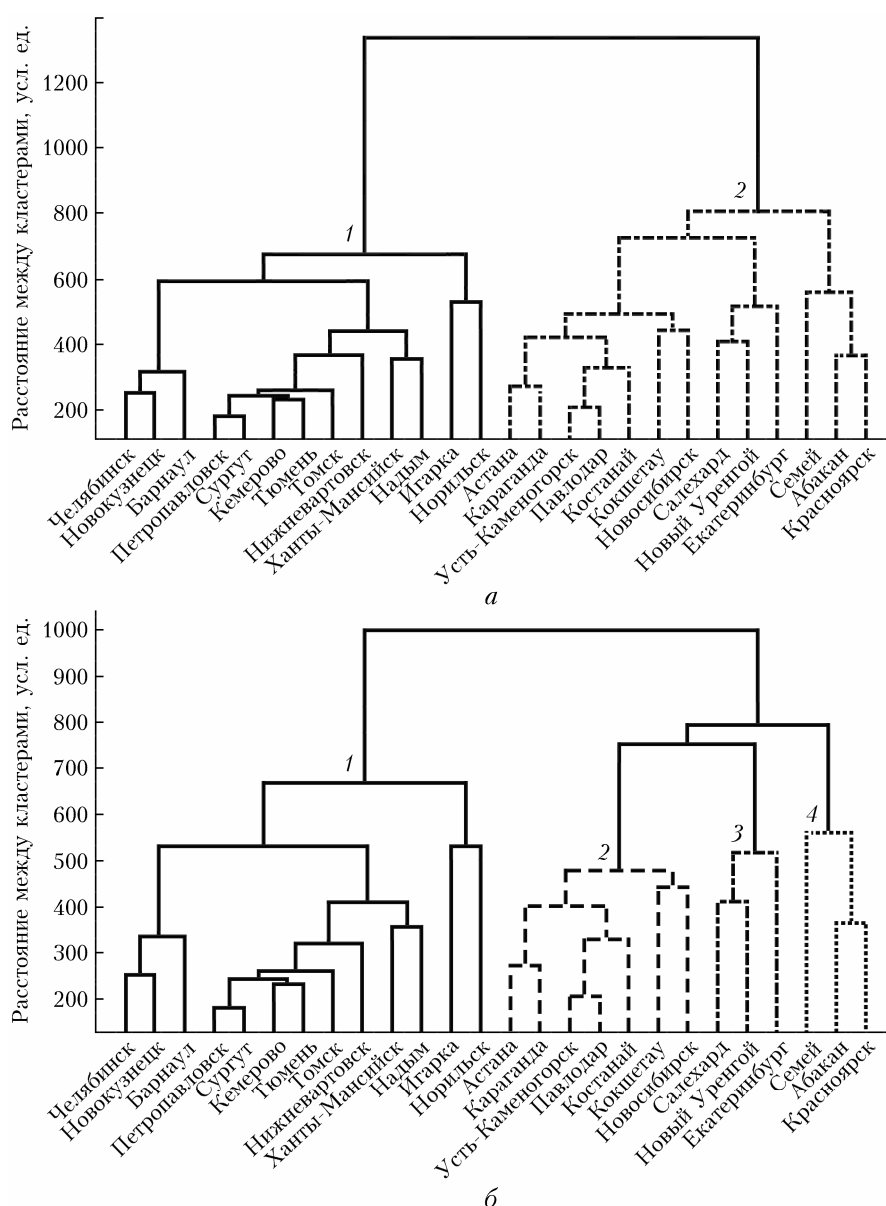


Рис. 4. Результаты кластерного анализа внутригодового хода среднемесячных оценок высоты основания кучево-дождевых облаков методами невзвешенного попарного среднего (WPGMA) (а) и взвешенного попарного среднего (UPGMA) (б); 1–4 – номера групп



как изменчивость ВНГ кучево-дождевых облаков значительно отличается в разных частях ЗС, что может быть обусловлено различным характером и интенсивностью протекания конвективных процессов. Нижняя граница облака определяется высотой, на которой происходит конденсация водяного пара при определенной температуре. ВНГ облачности понижается, если уменьшается дефицит точки росы или коэффициент турбулентности, а также увеличивается вертикальный градиент температуры или вертикальная скорость воздуха [23]. Полученные в работе [15] линейные зависимости ВНГ нижней облачности от атмосферных условий (характеристик влажности и температуры) подтверждают данный вывод.

Выявленные в нашей работе особенности, которые отражаются как в результатах кластерного анализа, так и в характере сезонного хода, обусловлены значительным влиянием характера подстилающей поверхности (для залесенной территории, переувлажненных районов и болот, т.е. поверхностей, с которых происходит интенсивная транспирация, как следствие, повышается относительная влажность воздуха). Вне вегетационного периода ВНГ облаков будет определяться локальными характеристиками рельефа и свойствами воздушных масс, которые формируются также на фоне наблюдаемого в начале XXI в. увеличения повторяемости меридиональных типов циркуляции (частично проявляется в меридиональном характере распределения ВНГ *Сб* на рис. 2). Их развитие приводит к усилению процессов блокирования и увеличению частоты и интенсивности опасных природных явлений, связанных преимущественно с конвективной облачностью [24].

## Заключение

В результате проведенного анализа по данным лазерного зондирования за 2010–2021 гг. установлено, что над территорией Западной Сибири в целом происходят уменьшение ВНГ нижней облачности и увеличение высоты нижней границы кучево-дождевых облаков. В пространственном распределении ВНГ нижней облачности увеличивается с севера (минимум – Игарка, Норильск) на юг (максимум – Усть-Каменогорск и Семей). В распределении ВНГ кучево-дождевой облачности прослеживается более меридиональный характер: области с минимальной высотой находятся в западной (восточная периферия Уральских гор) и восточной (вблизи побережья Карского моря) частях региона, а с максимальной – в южной. Здесь максимальные значения наблюдаются в основном в летние месяцы. Для станций, расположенных в центральной и северных частях региона, в сезонном ходе ВНГ прослеживаются два максимума: для нижней облачности – летом и весной, а для кучево-дождевой облачности – зимой и летом. На севере для нижней облачности, как правило, наблюдается еще и весенний максимум.

Результаты кластерного анализа показали, что на всех АМСГ (кроме ст. Усть-Каменогорск) отмечается подобие внутригодового хода ВНГ нижней

облачности, а для кучево-дождевых облаков наблюдаются значительные различия между станциями, что обусловлено характером подстилающей поверхности, высотой местности, а также региональными особенностями атмосферной циркуляции и конвективных процессов. Важно отметить, что на изменчивость ВНГ облачности влияет большое количество факторов, что в рамках задач данной статьи затрудняет анализ полученных результатов и установление причинно-следственных связей. Для этого в дальнейшем необходим более комплексный подход с привлечением дополнительных данных.

Таким образом, в результате проведенного исследования впервые для региона Западной Сибири получены оценки пространственно-временной изменчивости ВНГ кучево-дождевой облачности, которые будут полезны при описании и уточнении региональных особенностей атмосферных процессов, особенно на фоне усиления экстремальности климата. Практическое применение результатов возможно при создании и тестировании моделей климата и численных прогнозов погоды, преимущественно связанных с прогнозом опасных конвективных явлений, а также в сфере обеспечения безопасности полетов воздушных судов.

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 21-71-10076, <https://rscf.ru/project/21-71-10076>) и в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН (№ 121031300154-1).

## Список литературы

1. *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, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekli, R. Yu, B. Zhou (eds.). Cambridge University Press, 2023. 2391 p. DOI: 10.1017/9781009157896.*
2. *Мохов И.И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестн. РАН. 2022. Т. 92, № 1. С. 3–14.*
3. *Chen B., Liu Z. Global water vapor variability and trend from the latest 36-year (1979 to 2014) data of ECMWF and NCEP reanalyses, radiosonde, GPS, and microwave satellite // J. Geophys. Res.: Atmos. 2016. V. 121. P. 11442–11462.*
4. *Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорол. и гидрол. 2022. № 5. С. 27–41.*
5. *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. 124 с.*
6. *Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ильин С.Н., Ломкина Н.Я. Оценка локальных особенностей долговременного изменения облачного покрова над территорией Сибири с использованием результатов ее климатического районирования по режиму общей и нижней облачности // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28,*

- № 1. С. 59–65; *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 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 265–272.
7. *Chernokul'skiy A.V., Esau I., Bulygina O.N., Davy R.* Climatology and interannual variability of cloudiness in the Atlantic Arctic from surface observations since the late Nineteenth Century // *J. Clim.* 2017. V. 30, N 6. P. 2103–2120.
  8. *Безрукова А.Н., Чернокульский А.В.* Российские исследования облаков и осадков в 2015–2018 гг. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2020. Т. 56, № 4. С. 397–417.
  9. *Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н.* Режим низкой облачности и прогноз высоты ее нижней границы на аэродромах азиатской территории России // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы.* 2019. № 2. С. 59–75.
  10. *ВМО-№ 8.* Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Женева: ВМО, 2014. 1389 с.
  11. *Doc 8896.* Руководство по авиационной метеорологии. Монреаль: ICAE, 2009. 177 с.
  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.
  13. *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 атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 7. С. 579–583.
  14. *Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко А.В.* Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 1. Статистика нижней слоистообразной облачности // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 7. С. 622–629.
  15. *Ветрова Е.И., Скриптунова Е.Н., Шакина Н.П.* Режим низкой облачности и ее прогноз на аэродромах европейской территории бывшего СССР // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 1. С. 12–31.
  16. *Чернокульский А.В.* Анализ глобального поля облачности и связанных с его вариациями климатических эффектов. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2010. 179 с.
  17. *Харюткина Е.В., Логинов С.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н., Мартынова Ю.В.* Динамика характеристик экстремальности климата и тенденции опасных метеорологических явлений на территории Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 2. С. 136–142; *Kharyutkina E.V., Loginov S.V., Moraru E.I., Pustovalov K.N., Martynova Yu.V.* Dynamics of extreme climatic characteristics and trends of dangerous meteorological phenomena over the Territory of Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 4. P. 394–401.
  18. *Iowa State University.* Iowa Environmental Mesonet. ASOS-AWOS-METAR Data Download [Электронный ресурс]. URL: <https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml> (дата обращения: 20.02.2023).
  19. *Облакомер CL31.* Руководство пользователя. Vaisala, 2005. 131 с.
  20. *Петин А.Н., Васильев П.В.* Геоинформатика в радиональном недропользовании. Белгород: БелГУ, 2011. 268 с.
  21. *Голицын Г.С., Руткевич Б.П., Руткевич П.Б.* Нижняя граница облачности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2006. Т. 1, № 3. С. 263–269.
  22. *Бадахова Г.Х., Волкова В.И., Шевченко А.И.* Пространственно-временное распределение облачности в Ставропольском крае в современных климатических условиях // *Наука и образование сегодня.* 2020. № 6. Ч. 1. С. 97–101.
  23. *Хромов С.П., Мамонтова Л.И.* Метеорологический словарь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 568 с.
  24. *Кононова Н.К.* Изменения глобальной циркуляции атмосферы в период 1899–2018 гг. // *Фундамент. и прикл. климатол.* 2019. № 4. С. 120–138.

***K.N. Pustovalov, E.V. Kharyutkina, E.I. Moraru. Variability of the cloud base height over the territory of Western Siberia based on laser sounding data for the period 2010–2021.***

Changes in the base height of the lower layer cloudiness and cumulonimbus clouds over the territory of Western Siberia are analyzed based on laser data for the period 2010–2021. We established that, in general, there is a decrease in the base height of lower clouds and its increase for cumulonimbus clouds. An increase in the base height of lower cloudiness occurs from north to south. More meridional distribution is obtained for cumulonimbus clouds. The seasonal course of the lower cloudiness and cumulonimbus clouds base height in the south of the territory has a maximum in summer. Two maxima are observed in the center and in the north: for lower cloudiness in summer and spring and for cumulonimbus clouds in winter and summer. The results of the cluster analysis show a significant difference in the base height for cumulonimbus clouds (in comparison with lower cloudiness) at different stations, which is presumably due to differences in earth's surface characteristics and station height above sea level, as well as regional features of atmospheric circulation and convective processes