

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

МЕТЕОРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.513:551.587

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-116-125

СЕЗОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ИЗМЕНЕНИЙ ВЫСОТЫ
ОБЛАЧНОСТИ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИНадежда Николаевна Безуглова¹, Константин Юрьевич Суковатов², Татьяна Витальевна Носкова³,
Татьяна Савельевна Папина⁴^{1, 2, 3, 4} Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, г. Барнаул, Россия¹ bezuglovan@gmail.com² skonstantiny@gmail.com³ ntv@iwep.ru⁴ tanya.papina@mail.ru

Аннотация. В работе на основе данных реанализа ERA5, количества выпавших осадков, нижней границы облачности (НГО) выполнена оценка сезонных различий в циркуляционных процессах, определяющих в 2014–2023 гг. перенос влаги и загрязняющих веществ воздушными массами на территорию юга Западной Сибири. Показано, что для холодного сезона характерна однонаправленность движения воздушных масс как в нижних слоях атмосферы, так и в средней тропосфере, которая определяется западными и юго-западными потоками. В противоположность холодному сезону для теплого сезона характерна разнонаправленность движений в нижних слоях атмосферы и в средней тропосфере: для средней тропосферы, как и в холодный сезон, свойственны западные и юго-западные потоки, а для нижних слоев преобладающими являются северо-западные потоки. С помощью модели HYSPLIT на даты выпадения осадков были построены траектории, соответствующие высоте облачного слоя, которые также показали отличия в разные сезоны как по направлению, так и по продолжительности: в теплом сезоне среднее направление перемещения воздушных масс на исследуемую территорию северо-западное, в холодном – юго-западное-западное.

Определено, что для холодного периода высота облачности, при которой преимущественно происходило выпадение осадков (70,1 % по количеству дней с осадками и 60,0 % по объему осадков), составляла ≥ 2500 м, в то время как для теплого периода максимальное количество осадков приходилось на высоту в интервале 600–1000 м (85,3 % и 87,5 % соответственно). Сделан вывод, что для холодного периода года вклад дальнего трансграничного переноса на поступление влаги и загрязняющих веществ на подстилающую поверхность изучаемой территории будет существенно выше, чем для теплого периода, когда воздушные массы дальнего трансграничного переноса будут проходить над изучаемой территорией транзитом.

Ключевые слова: циркуляционные процессы, атмосферные осадки, юг Западной Сибири

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН № 0306-2021-0004 «Оценка сезонных особенностей атмосферного поступления и последующего распределения загрязняющих веществ на водосборной площади ключевых участков бассейна Оби в зависимости от природно-климатических условий».

Для цитирования: Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С. Сезонные особенности циркуляционных процессов и изменений высоты облачности над территорией юга Западной Сибири // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 1 (72). С. 116–125. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-116-125

METEOROLOGY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-116-125

SEASONAL FEATURES OF CIRCULATION PROCESSES AND CHANGES IN CLOUD HEIGHT OVER
THE TERRITORY OF THE SOUTH OF WESTERN SIBERIANadezhda N. Bezuglova¹, Konstantin Yu. Sukovатов², Tatyana V. Noskova³, Tatyana S. Papina⁴^{1, 2, 3, 4} Institute for Water and Environmental Problems, SB RAS, Barnaul, Russia¹ bezuglovan@gmail.com² skonstantiny@gmail.com³ ntv@iwep.ru⁴ tanya.papina@mail.ru

© 2025 Эта работа Безугловой Н.Н., Суковатова К.Ю., Носковой Т.В., Папиной Т.С. лицензирована по CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите сайт <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

Abstract. Basing on the ERA5 reanalysis data, the amount of precipitation, and the cloud base, we assessed seasonal differences in circulation processes that determined the transfer of moisture and pollutants by air masses to the territory of the south of Western Siberia in 2014–2023. The paper shows that the cold season is characterized by unidirectional movement of air masses, both in the lower layers of the atmosphere and in the middle troposphere, which is associated with western and southwestern flows. In contrast to the cold season, the warm season is characterized by multidirectional movements in the lower layers of the atmosphere and in the middle troposphere: for the middle troposphere, as in the cold season, western and southwestern flows are predominant, while for the lower layers northwestern flows are predominant. Using the HYSPLIT model, trajectories corresponding to the cloud layer height were constructed for the dates of precipitation, which also showed differences in different seasons, both in direction and duration: in the warm season the average direction of air masses movement to the study area is northwestern, in the cold season – southwestern.

The study has found that for the cold period the height of the cloud base at which precipitation predominantly occurred (70.1% in terms of the number of days with precipitation and 60.0% in terms of precipitation volume) was ≥ 2500 m, while for the warm period the maximum precipitation amount was recorded at the height of the cloud base in the range of 600–1000 m (85.3% and 87.5% respectively). It is concluded that for the cold period of the year, the contribution of long-range transboundary transport to the supply of moisture and pollutants to the underlying surface of the study area will be significantly higher than for the warm period, when air masses of long-range transboundary transport will transit over the study area.

Keywords: circulation processes, atmospheric precipitation, south of Western Siberia

Funding. The study was funded as part of the state assignment undertaken by IWEP, SB RAS, No. 0306-2021-0004 ‘Assessment of seasonal features of atmospheric intake and subsequent distribution of pollutants in the catchment of key areas of the Ob River basin depending on natural and climatic conditions’.

For citation: Bezuglova, N.N., Sukovатов, K.Yu., Noskova, T.V., Papina, T.S. (2025). Seasonal features of circulation processes and changes in cloud height over the territory of the south of Western Siberia. *Geographical Bulletin*. No. 1(72). Pp.116–125. doi: 10.17072/2079-7877-2025-1-116-125

Введение

Общая атмосферная циркуляция обеспечивает перемещение воздушных масс, в результате которого происходит перенос тепла и влаги, что формирует климатический режим территории [2]. Особенности воздушных течений в различных областях Северного полушария зависят от глобальной циркуляции, географического положения, а также сезона года [4, 6, 8, 16, 17]. При этом особо значимое влияние циркуляция оказывает на облачность и атмосферные осадки [2]. Облачность, в свою очередь, воздействует на циркуляцию, вызывая явление мезоциркуляции на отдельных участках. Таким образом, атмосферная циркуляция в каждом конкретном регионе ответственна за перемещение циклонов и связанных с ними облачных систем, однако в научном сообществе все еще существует неопределенность понимания того, как взаимодействуют облака, циркуляция и климат [11].

В последнее время в связи с глобальным поступлением загрязняющих веществ в окружающую среду большой интерес вызывает взаимосвязь между крупномасштабной общей циркуляцией и распределением загрязняющих веществ в атмосфере [9, 21]. Поток загрязняющих веществ от глобальных, региональных и локальных источников загрязнения характеризуется дальностью их переноса, определяемой, как правило, высотой нахождения загрязняющих веществ над подстилающей поверхностью земли. Так как поступление основного количества загрязняющих веществ из атмосферы на подстилающую поверхность в регионах умеренного климата происходит во время выпадения атмосферных осадков [12–14], для оценки вклада глобального и регионального переноса на фоне локальных выбросов важно знать высоту облачности, при которой происходит конденсация влаги и формирование осадков над изучаемой территорией, а анализ региональных особенностей циркуляции позволит определить траектории перемещения воздушных масс, приходящих в исследуемый район.

Цель данной работы – на примере Алтайского края оценить различия в циркуляционных процессах, определяющих перенос влаги и загрязняющих веществ воздушными массами на территорию юга Западной Сибири для холодного и теплого сезонов.

Объекты и методы исследования

В работе выполнен анализ данных по осадкам, нижней границе облачности (НГО) и геопотенциале за 2014–2023 гг. Объектами исследования являются атмосферные выпадения на территории водосбора Верхней Оби в пределах Алтайского края (рис. 1) и сезонная региональная атмосферная циркуляция над данной территорией.

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

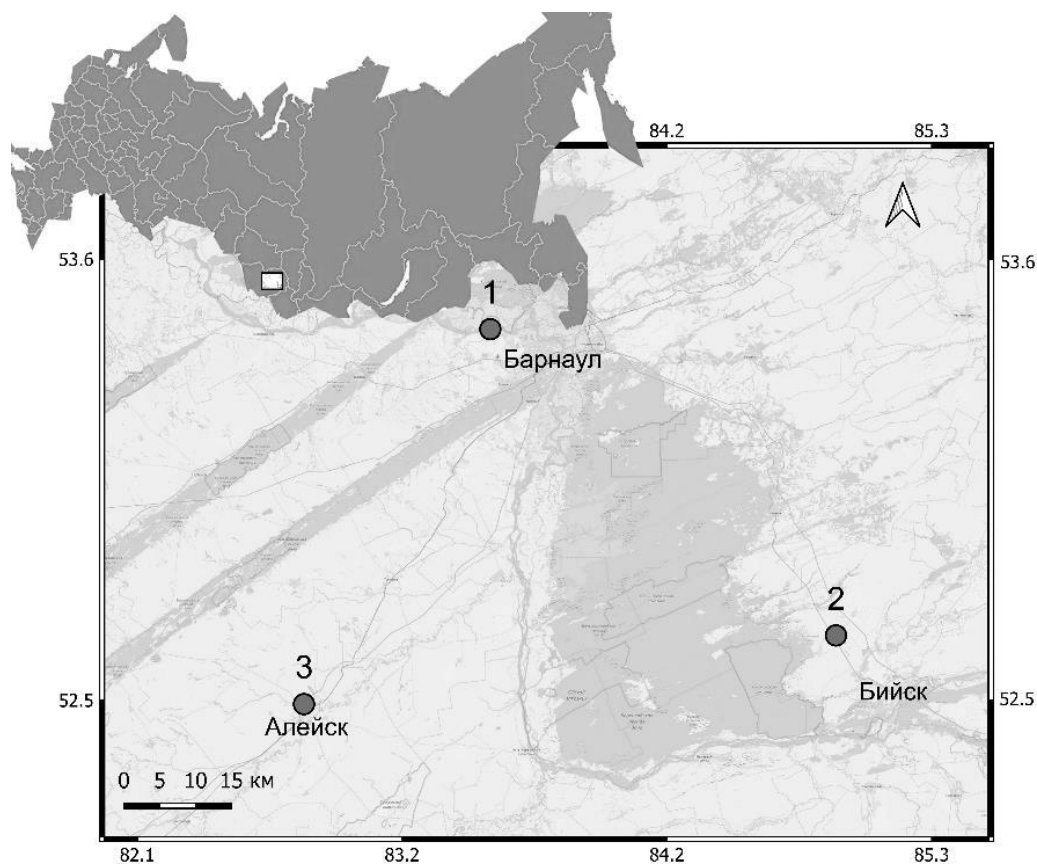


Рис. 1. Карта-схема расположения метеорологических станций на изучаемой территории (1 – метеостанция № 29838; 2 – метеостанция № 29939; 3 – метеостанция № 29937)

Fig. 1. The meteorological stations' location in the study area

(1 - weather station No. 29838, 2 - weather station No. 29939, 3 - weather station No. 29937)

Для оценки вклада воздушных масс, перемещающихся на разной высоте от поверхности земли и приносящих на изучаемую территорию влагу, выпадающую в виде атмосферных осадков, был выполнен анализ распределения количества осадков по высоте нижней границы облачности в различные сезоны 2014–2023 гг. на метеостанции № 29838 (г. Барнаул). Для обоснования возможности распространения данных, полученных на метеостанции № 29838, на весь изучаемый регион было проведено сопоставление объемов атмосферных выпадений в теплый и холодный сезоны 2014–2023 гг. на трех метеостанциях Алтайского края, расположенных в разных местах изучаемого региона (рис. 1). В качестве исходных данных были использованы архивные материалы сайта «Расписание погоды» [5].

Для анализа особенностей региональной сезонной циркуляции на основе данных реанализа ERA5 [15] для исследуемой территории были построены пространственные распределения геопотенциала и линий тока на уровне 850 гПа.

Модель HYSPLIT [18] была применена для расчетов траекторий воздушных масс, приходящих на изучаемую территорию. Расчеты средних по сезонам траекторий и построение пространственных распределений анализируемых параметров проводились с помощью разработанных авторами программных сценариев на языке программирования Python, которые использовали возможности дополнительных библиотек [10].

Результаты и их обсуждение

Сопоставление средних значений количества атмосферных осадков, зафиксированных в теплый и холодный период 2014–2023 гг. на трех метеостанциях Алтайского края, расположенных на различных участках изучаемой территории (рис. 1), показало отсутствие статистически значимых между ними различий (рис. 2). Известно, что характерный масштаб синоптических процессов для средних и высоких широт составляет ~ 1000 км, поэтому, учитывая размер исследуемой территории и отсутствие существенных орографических препятствий, синоптические процессы, определяющие погодные условия на территории, можно считать однородными [1]. Таким образом, изучаемая территория является равнинным участком Приобского плато, где отсутствуют явно выраженные аэрографические барьеры на пути движения преобладающих западных воздушных течений [20], поэтому данные о количественном составе атмосферных осадков, полученные в любой точке изучаемой площади (рис. 1), можно распространить на всю территорию.

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

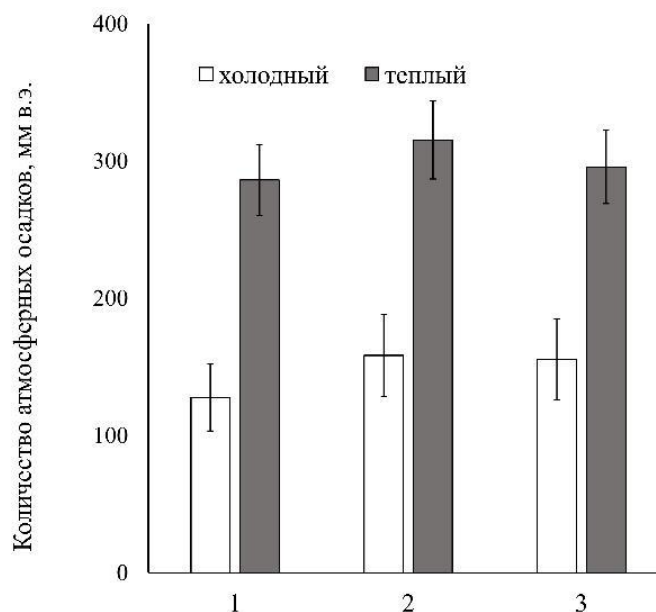


Рис. 2. Средние значения количества сезонных атмосферных выпадений на подстилающую поверхность

Алтайского края в 2014–2023 гг. (1 – метеостанция № 29838 Барнаул;

2 – метеостанция № 29939 Бийск-Зональное; 3 – метеостанция № 29937 Алейск)

Fig. 2. Average values of seasonal atmospheric precipitation on the underlying surface of the Altai Territory in 2014–2023 (1 - weather station No. 29838 Barnaul;

2 - weather station No. 29939 Biysk-Zonalnoye; 3 - weather station No. 29937 Aleysk)

Распределение атмосферных осадков по высоте НГО в холодный (снег) и теплый (дождь) период по данным метеостанции Барнаул приведено в табл., из которой следует, что для холодного периода высота облачности, при которой преимущественно происходило выпадение осадков (70,1 % по количеству дней с осадками и 60,0 % по объему осадков), составляла ≥ 2500 м, в то время как для теплого периода максимальное количество осадков приходилось на высоту в интервале 600–1000 м (85,3 и 87,5 % соответственно).

Тем самым можно предположить, что для холодного периода года вклад дальнего трансграничного переноса на поступление влаги и загрязняющих веществ на подстилающую поверхность изучаемой территории будет существенно выше, чем для теплого периода, когда воздушные массы дальнего трансграничного переноса будут проходить над изучаемой территорией транзитом.

Таблица

Распределение сезонных атмосферных выпадений в 2014–2023 гг. в зависимости от высоты нижней границы облачности (НГО) по данным метеостанции № 29838 Барнаул

The distribution of seasonal atmospheric deposition in 2014–2023 depending on the height of the cloud base according to the data from the weather station No. 29838 Barnaul

| Количество осадков (%) относительно их общего количества за сезон в зависимости от нижней границы облачности (м): n – по количеству дней с осадками; в.э. – по мм в.э. | | | | | | | | |
|---|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Сезон, год | 300–600 м | | 600–1000 м | | 1000–1500 м | | ≥ 2500 м | |
| | n | в.э. | n | в.э. | n | в.э. | n | в.э. |
| Теплый, 2014 | 4,8 | 7,5 | 82,5 | 87,2 | 1,6 | 0,1 | 11,1 | 5,2 |
| Теплый, 2015 | 0 | 0 | 90,9 | 88,2 | 3 | 3,2 | 6,1 | 8,6 |
| Теплый, 2016 | 4,4 | 10 | 82,3 | 80 | 4,4 | 1,5 | 8,9 | 8,5 |
| Теплый, 2017 | 4,2 | 5,5 | 84,3 | 89,7 | 8,6 | 3,4 | 2,9 | 1,4 |
| Теплый, 2018 | 12,3 | 1,5 | 77,2 | 78,6 | 5,3 | 4,6 | 5,2 | 15,3 |
| Теплый, 2019 | 0 | 0 | 90,2 | 92,9 | 4,9 | 5,7 | 4,9 | 1,4 |
| Теплый, 2020 | 1,8 | 4,1 | 84,2 | 85,6 | 0 | 0 | 14 | 10,3 |
| Теплый, 2021 | 2,1 | 0,6 | 76,6 | 87 | 4,3 | 2,7 | 17 | 9,7 |
| Теплый, 2022 | 2 | 1,9 | 87,6 | 88,3 | 0 | 0 | 10,4 | 9,8 |
| Теплый, 2023 | 0 | 0 | 96,9 | 97,3 | 0 | 0 | 3,1 | 2,7 |
| *Среднее за 10 сезонов | $3,2 \pm 3,5$ | $3,1 \pm 3,4$ | $85,3 \pm 6,0$ | $87,5 \pm 5,2$ | $3,2 \pm 2,7$ | $2,1 \pm 2,0$ | $8,4 \pm 4,5$ | $7,3 \pm 4,3$ |
| Холодный, 2014–2015 | 1,5 | 2,6 | 21,2 | 20 | 0 | 0 | 77,3 | 77,4 |
| Холодный, 2015–2016 | 0 | 0 | 31,8 | 40,9 | 2,3 | 5,5 | 65,9 | 53,6 |

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

Окончание таблицы

| Количество осадков (%) относительно их общего количества за сезон в зависимости от нижней границы облачности (м): <i>n</i> – по количеству дней с осадками; <i>в.э.</i> – по мм в.э. | | | | | | | | |
|---|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| Сезон, год | 300–600 м | | 600–1000 м | | 1000–1500 м | | ≥2500 м | |
| | <i>n</i> | <i>в.э.</i> | <i>n</i> | <i>в.э.</i> | <i>n</i> | <i>в.э.</i> | <i>n</i> | <i>в.э.</i> |
| Холодный, 2016–2017 | 0 | 0 | 30,4 | 46,3 | 0 | 0 | 69,6 | 53,7 |
| Холодный, 2017–2018 | 1,6 | 1 | 32,8 | 54,7 | 6,6 | 3 | 59 | 41,3 |
| Холодный, 2018–2019 | 1,5 | 1 | 34,3 | 49,3 | 0 | 0 | 64,2 | 49,7 |
| Холодный, 2019–2020 | 0 | 0 | 25 | 34 | 0 | 0 | 75 | 66 |
| Холодный, 2020–2021 | 0 | 0 | 20,8 | 23,5 | 0 | 0 | 79,2 | 76,5 |
| Холодный, 2021–2022 | 0 | 0 | 32,4 | 39,5 | 0 | 0 | 67,6 | 60,5 |
| Холодный, 2022–2023 | 0 | 0 | 26,6 | 39,1 | 0 | 0 | 73,4 | 60,9 |
| *Среднее за 9 сезонов | 0,5 ± 0,7 | 0,5 ± 0,8 | 28,4 ± 4,8 | 38,6 ± 10,7 | 1,0 ± 2,1 | 0,9 ± 1,9 | 70,1 ± 6,3 | 60,0 ± 11,3 |

*приведено среднее значение и его доверительный интервал при $P = 0,95$

Для объяснения полученных нами сезонных различий в распределении атмосферных выпадений в зависимости от нижней границы облачности (табл.) были изучены региональные особенности циркуляционных процессов для изучаемой территории.

По данным ежемесячных обзоров особенностей атмосферной циркуляции Гидрометцентра РФ, в средней тропосфере поле геопотенциала в течение 2014–2023 гг. преимущественно отличалось от климатического (среднего многолетнего) как в масштабе Северного полушария, так и в отдельных регионах. Основная особенность – усиление межширотного обмена между высокими и средними широтами (активизация меридиональности атмосферных процессов) на полушарии в целом, в том числе на территории Урала, Сибири, Дальнего Востока [3].

На рис. 3 и 4 представлены средние многолетние пространственные распределения геопотенциала и линии тока для уровня 850 гПа в рамках холодного и теплого сезонов за 2014–2023 гг. Цветовая шкала соответствует значениям геопотенциала ($\text{м}^2/\text{с}^2$): все оттенки синего – минимальные значения, голубой-зеленый – средние значения, желтый-красный – максимальные значения. (Высокие значения геопотенциала соответствуют полю высокого давления, минимальные – полю низкого.)

В холодный сезон (рис. 3) область минимальных значений геопотенциала находилась в высоких широтах, к северу от параллели 60° с.ш. Струйное течение, ограничивающее полярный вихрь, располагалось в широтном направлении. Над территорией Сибири в средних широтах наблюдался высотный гребень. В соответствии с расположением линий тока на юг Западной Сибири распространялись воздушные массы как из южных, так и из центральных районов Атлантики. Таким образом, создавались условия и для выхода южных циклонов, и для перемещения на исследуемую территорию атлантических циклонов по западным траекториям.

Сохранение поля высокого давления на юго-востоке и низкого на севере вызывает сгущение линий тока на границе этих полей, что, в свою очередь, способствует активизации атмосферных фронтов (фронтотенеза) и, соответственно, развитию фронтальной облачности.

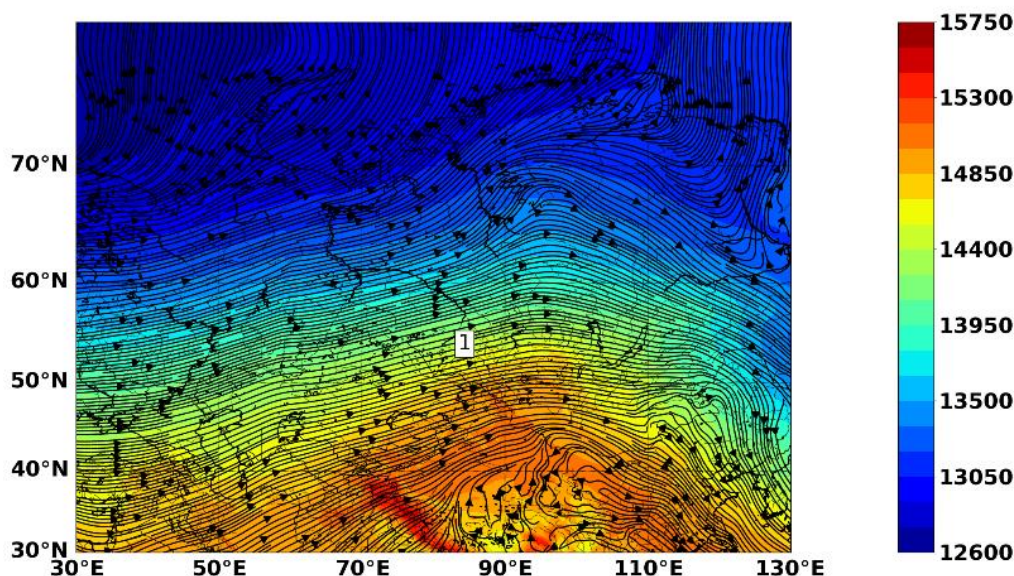


Рис. 3. Пространственное распределение геопотенциала и линии тока для уровня 850 гПа в холодный сезон

Fig. 3. Spatial distribution of geopotential and streamlines for the level of 850 hPa in the cold season

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

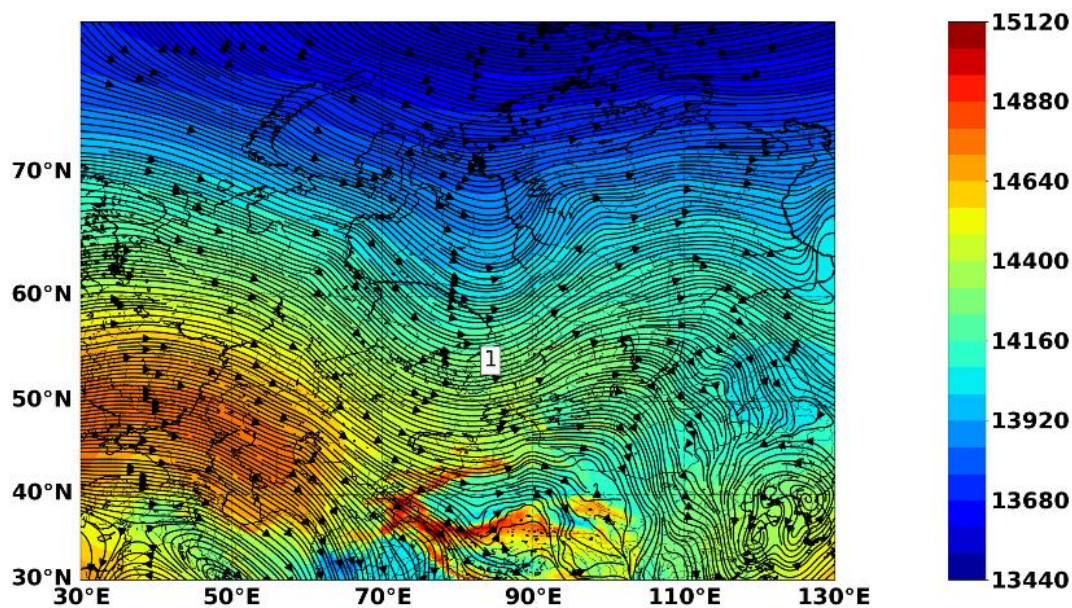


Рис. 4. Пространственное распределение геопотенциала и линии тока для уровня 850 гПа в теплый сезон

Fig. 4. Spatial distribution of geopotential and streamlines for the level of 850 hPa in the warm season

Теплый сезон (рис. 4) характеризовался явно выраженной меридиональностью процессов как в высоких, так и в средних широтах. Над Европейской частью России и районами Восточной Сибири находились высотные гребни. Западная Сибирь оказывалась под влиянием высотной ложбины. Атлантические циклоны, смещаясь по северо-западной траектории (по северным морям), достигали территории Западной Сибири. Исследуемая территория при этом была под влиянием южной периферии атлантических циклонов, где влияние атмосферных фронтов значительно ослабевает. Поступление холодных влажных воздушных масс на прогретую в теплый период подстилающую поверхность способствовало созданию условий для развития неустойчивой атмосферной стратификации и развитию конвективных процессов (внутримассовых конвективных облаков).

Характеристики (параметры) облачности в существенной степени определяются локальными метеорологическими параметрами в зоне ее расположения, однако наиболее важным фактором формирования облачности является адвекция воздушных масс [7, 19]. Для определения источников влаги и возможных источников эмиссии загрязняющих веществ, поступающих на изучаемую территорию, были рассчитаны обратные 10-дневные траектории для каждого месяца теплого (апрель-октябрь) и холодного (ноябрь-март) сезонов 2014–2023 гг., а затем были рассчитаны средние траектории для каждого сезона.

На рис. 5 и 6 представлены средние многолетние траектории для холодного и теплого сезонов. Обратные траектории построены для уровней, соответствующих высотам нижней границы облачности (НГО): для холодного сезона на высоте 2500 и 3500 м, для теплого – на высоте 600 и 1000 м.

Поскольку циркуляционные характеристики средней тропосферы (на уровне 500 гПа) являются одним из определяющих факторов динамики атмосферных движений, также построены траектории для высоты 5000 м применимо к холодному и теплему сезонам.

В теплый сезон для уровней, соответствующих высоте НГО, наблюдается большое разнообразие траекторий с завихрениями и с различными видами кривизны (искривления), соответствующих разным типам меридиональных процессов. В холодный сезон для уровней, соответствующих высоте НГО, и на высоте средней тропосферы для обоих сезонов траектории менее возмущены и, как правило, соответствуют западно-восточному переносу в средних широтах. Поэтому траектории, усредненные при одинаковой временной продолжительности (10 дней), для высот НГО теплого сезона получаются короче, чем для высот НГО холодного сезона и для уровня средней тропосферы (5000 м) обоих сезонов.

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

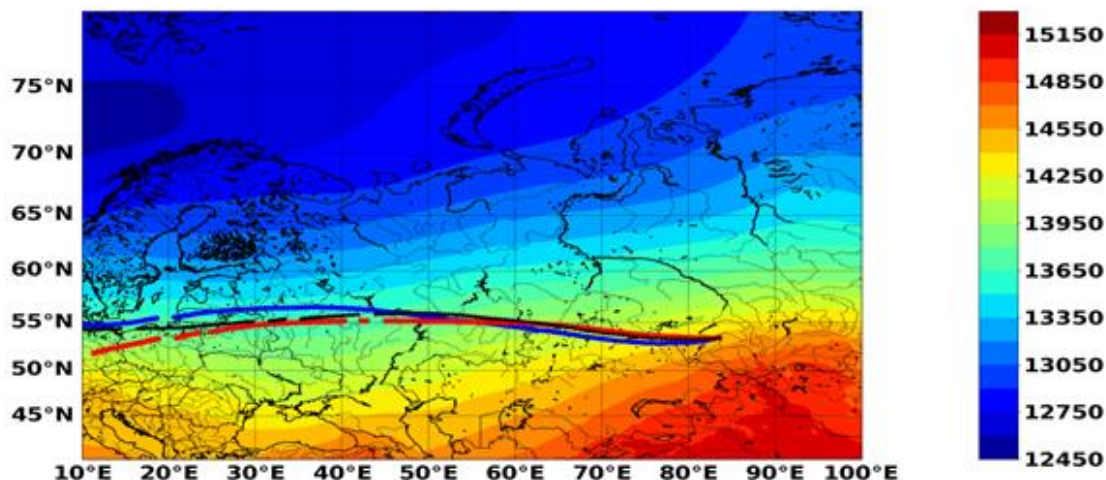


Рис. 5. Средние значения поля геопотенциала и средние траектории для холодного сезона (ноябрь–март, 2014–2023 гг.). Траектория для высоты 2500 м – синими кружочками, 3500 м – черными звездочками, 5000 м – красными квадратами

Fig. 5. Average values of the geopotential field and average trajectories for the cold season (November–March, 2014–2023). The trajectory for an altitude of 2500 m – in blue circles, for 3500 m – in black stars, for 5000 m – in red squares

В холодный сезон в среднем многолетнем (в течение 2014–2023 гг.) преобладающим направлением было юго-западное-западное (рис. 5). Траектории на высотах 2500, 3500 и 5000 м практически совпадают. Направление перемещения воздушных масс на уровне нижней границы облачности и в средней тропосфере аналогично. Таким образом, на процесс облакообразования в холодный период оказывали влияние динамические процессы всего рассматриваемого слоя атмосферы (2500–5000 м), а поступление воздушных масс на исследуемую территорию происходило из восточных районов центральной Атлантики.

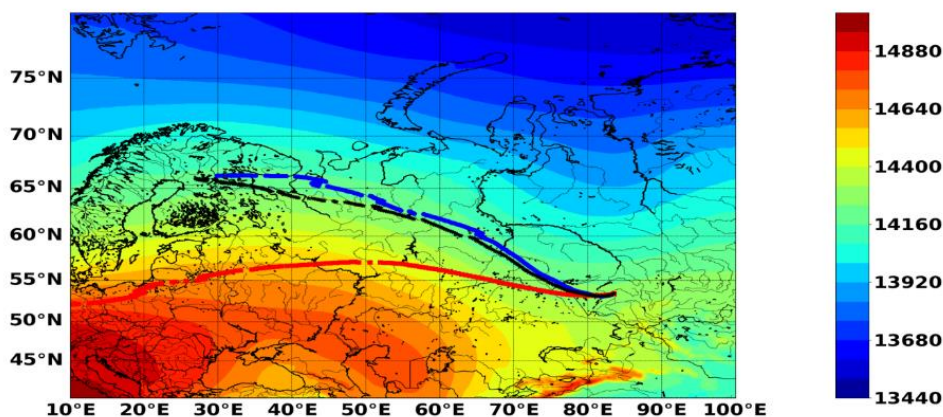


Рис. 6. Средние значения поля геопотенциала и средние траектории для теплого сезона (апрель–октябрь, 2014–2023 гг.). Траектория для высоты 600 м – синими кружочками, 1000 м – черными звездочками, 5000 м – красными квадратами

Fig. 6. Average values of the geopotential field and average trajectories for the warm season (April–October, 2014–2023). The trajectory for an altitude of 600 m – in blue circles, for 1000 m – in black stars, 5000 m – in red squares.

В отличие от холодного сезона, в теплый сезон траектории на уровне 600 и 1000 м практически совпадают (рис. 6), однако существенно отличаются от направления движения воздушных масс в средней тропосфере. Формирование облачности в теплый сезон определялось процессами в нижней части тропосферы, а воздушные массы на исследуемую территорию поступали в основном с севера Скандинавии.

Выводы

Для исследуемой территории среднее поле геопотенциала и направление движения воздушных масс (линии тока) отличаются в разные сезоны года.

Для холодного сезона характерна однонаправленность движений в нижних слоях атмосферы и в средней тропосфере. Для средней тропосферы и для нижних слоев атмосферы характерны западные и юго-западные потоки, что может свидетельствовать о наличии однотипных механизмов переноса на разных уровнях

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

(преобладании «дальнего» переноса) для холодного сезона. Движение на уровне средней тропосферы во многом определяет локальные движения в нижних слоях атмосферы.

В противоположность холодному сезону, для теплого сезона характерна разнонаправленность движений в нижних слоях атмосферы и в средней тропосфере. Для средней тропосферы, как и в холодный сезон, свойственны западные и юго-западные потоки. Для нижних слоев преобладающими являются северо-западные потоки, что может свидетельствовать о различии преобладающих механизмов переноса на тех или иных уровнях (преобладании «ближнего» переноса) для теплого сезона. Движение на уровне средней тропосферы в меньшей степени влияет на локальные движения в нижних слоях атмосферы.

Показано, что для холодного периода высота облачности, при которой преимущественно происходило выпадение осадков (70,1 % по количеству дней с осадками и 60,0 % по объему осадков), составляла ≥ 2500 м, в то время как для теплого периода максимальное количество осадков приходилось на высоту в интервале 600–1000 м (85,3 и 87,5 % соответственно). При этом траектории, соответствующие высоте облачного слоя, отличаются в разные сезоны как по направлению, так и по продолжительности. В теплый сезон среднее направление перемещения воздушных масс на исследуемую территорию северо-западное, в холодный – юго-западное-западное. В холодный сезон продолжительность средних 10-дневных траекторий существенно больше, чем в теплый. Поэтому можно сделать вывод, что в холодный сезон дальность переноса воздушных масс больше, чем в теплый сезон. Следовательно, вклад дальнего трансграничного переноса на поступление влаги и загрязняющих веществ на подстилающую поверхность изучаемой территории для холодного периода будет существенно выше, чем для теплого периода, когда воздушные массы дальнего трансграничного переноса будут проходить над изучаемой территорией транзитом.

Библиографический список

1. Вагер Б.Г., Надежина Е.Д. Пограничный слой атмосферы в условиях горизонтальной неоднородности. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 136 с.
2. Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Поднебесных Н.В. Циркуляция атмосферы над Западной Сибирью в 1976–2004 гг. // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 28–36.
3. Ежемесячные обзоры атмосферной циркуляции: Гидрометцентр РФ. URL: <https://meteoinfo.ru/circulation-review> (дата обращения 28.11.2023)
4. Литвинова О.С. Влияние макроциркуляционных условий на атмосферное увлажнение юга и юго-востока Западной Сибири // Географический вестник. 2020. № 2. С. 100–110. DOI: 10.17072/2079-7877-2020-2-100-110
5. Погода в Алтайском крае: Расписание погоды. URL: https://rp5.ru/Погода_в_Алтайском_крае (дата обращения 27.05.2024)
6. Попова В.В., Шмакин А.Б. Циркуляционные механизмы крупномасштабных аномалий температуры воздуха зимой в Северной Евразии в конце XX столетия // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 15–25.
7. Шакина Н.П., Скриптунова Е.Н. Спектры повторяемости осадков на территории европейской части бывшего СССР в зависимости от интенсивности фронтальных зон и конвективной неустойчивости сеточного масштаба // Метеорология и гидрология. 2006. № 4. С. 5–18.
8. Adler R., Gu G., Sapiiano M., Wang J.-J., Huffman G.J. Global Precipitation: Means, Variations and Trends During the Satellite Era (1979–2014) // Surveys in Geophysics. 2017. Vol. 38. P. 679–699. DOI: 10.1007/s10712-017-9416-4
9. Bahauddin M., Baltaci H., Onat B. The role of large-scale atmospheric circulations on long-term variations of PM10 concentrations over Turkey // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. P. 1260–1275. DOI: 10.1007/s11356-023-31164-6
10. Библиотека Basemap. URL: <https://matplotlib.org/basemap/stable/> (дата обращения 07.12.2023)
11. Bony S., Stevens B., Frierson D., Jakob C., Kageyama M., Pincus R., Shepherd T.G., Sherwood S.C., Siebesma A.P., Sobel A.H., Watanabe M., Webb M.J. Clouds, circulation and climate sensitivity // Nature Geoscience. 2015. No. 8. P. 261–268. DOI: 10.1038/ngeo2398
12. Cong Z., Kang S., Zhang Y., Li X. Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau // Applied Geochemistry. 2010. Vol. 25, No. 9. P. 1415–1421. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2010.06.011
13. Croft B., Lohmann U., Martin R.V., Stie P., Wurzler S., Feichter J., Hoose C., Heikkilä U., Donkelaar A., Ferrachat S. Influences of in-cloud aerosol scavenging parameterizations on aerosol concentrations and wet deposition in ECHAM5-HAM // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. Vol. 10. P. 1511–1543.
14. Croft B., Pierce J.R., Martin R.V., Hoose C., Lohmann U. Strong sensitivity of aerosol concentrations to convective wet scavenging parameterizations in a global model // Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. Vol. 12. P. 1687–1732.
15. ERA5: data documentation. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation> (дата обращения: 15.12.2023)
16. Fukutomi Y., Masuda K., Yasunari T. Cyclone activity associated with the interannual seesaw oscillation of summer precipitation over northern Eurasia // Global and Planetary Change. 2007. Vol. 56, No. 3–4. P. 387–398.
17. Hiyama T., Fujinami H., Kanamori H., Ishige T., Oshima K. Recent interdecadal changes in the interannual variability of precipitation and atmospheric circulation over northern Eurasia // Environment Research Letters. 2016. No. 11. DOI: 10.1088/1748-9326/11/6/065001
18. HYSPLIT Trajectories: Air Resources Laboratory. URL: https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php (дата обращения 25.01.2024)
19. Koracin D., Dorman C.E. Marine Atmospheric Boundary Layer Divergence and Clouds along California in June 1996 // Monthly Weather Review. 2001. Vol. 129. P. 2040–2056.

Метеорология

Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.

20. Papina T.S., Eirikh A.N., Eyrikh S.S. The use of the characteristics of water isotopic composition for assessing the contribution of winter and summer precipitation to the Upper Ob Runoff in the Open-water Period // *Water Resources*. 2024. Vol. 51, No. 4, P. 418–427. DOI: 10.1134/S0097807824700866

21. Yassin Mbululo, Qin Jun, Fatuma Nyihirani, Zhengxuan Yuan, Sijing Huang, Yajuan Wang. Relationship between air pollutant distribution and large-scale circulation // *Environmental Science: Advances*. 2023. No. 2. P. 1119–1129. DOI: 10.1039/D3VA00060E

References

1. Vager B.G., Nadezhina E.D. Boundary layer of the atmosphere in conditions of horizontal heterogeneity. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 136 p (In Russian)
2. Gorbatenko V.P., Ippolitov I.I., Podnebesnykh N.V. Atmospheric circulation over Western Siberia in 1976–2004 // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007. Vol. 32, No 5. P. 301–306.
3. Monthly reviews of atmospheric circulation: Hydrometeorological Center of the Russian Federation. URL: <https://meteo.info.ru/circulation-review>.
4. Litvinova O.S. The influence of macrocirculation conditions on atmospheric humidification in the south and south-east of Western Siberia // *Geographical Bulletin*. 2020. No 2. P. 100–110. (In Russian)
5. Weather in the Altai Krai: Weather schedule. URL: https://rp5.ru/Weather_in_Altai_Krai.
6. Popova V.V., Shmakina A.B. Circulation mechanisms of large-scale anomalies of air temperature in winter in Northern Eurasia at the end of the XX century // *Russian Meteorology and Hydrology* 2006. №12. P. 15–25. (In Russian)
7. Shakina N.P., Skriptunova E.N. Spectra of precipitation occurrence frequency in the former European USSR depending on frontal zone intensity and grid-scale convective instability // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2006. No 4. P. 1–11.
8. Adler R., Gu G., Sapiain M., Wang J.-J., Huffman G.J. Global Precipitation: Means, Variations and Trends During the Satellite Era (1979–2014) // *Surveys in Geophysics*. 2017. Vol. 38, P. 679–699.
9. Bahaiddin M., Baltaci H., Onat B. The role of large-scale atmospheric circulations on long-term variations of PM₁₀ concentrations over Turkey // *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. Vol. 31, P. 1260–1275.
10. Biblioteka Basemap. URL: <https://matplotlib.org/basemap/stable/> (дата обращения 07.12.2023).
11. Bony S., Stevens B., Frierson D., Jakob C., Kageyama M., Pincus R., Shepherd T.G., Sherwood S.C., Siebesma A.P., Sobel A.H., Watanabe M., Webb M.J. Clouds, circulation and climate sensitivity // *Nature Geoscience*. 2015. No 8, P. 261–268. doi:10.1038/ngeo2398.
12. Cong Z., Kang S., Zhang Y., Li X. Atmospheric wet deposition of trace elements to central Tibetan Plateau // *Applied Geochemistry*. 2010. Vol. 25, No 9. P. 1415–1421.
13. Croft B., Lohmann U., Martin R.V., Stie P., Wurzer S., Feichter J., Hoose C., Heikkila U., Donkelaar A., Ferrachat S. Influences of in-cloud aerosol scavenging parameterizations on aerosol concentrations and wet deposition in ECHAM5-HAM // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010. Vol. 10. P. 1511–1543.
14. Croft B., Pierce J.R., Martin R.V., Hoose C., Lohmann U. Strong sensitivity of aerosol concentrations to convective wet scavenging parameterizations in a global model // *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2012. Vol. 12, P. 1687–1732.
15. ERA5: data documentation. URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation> (дата обращения: 15.12.2023).
16. Fukutomi Y., Masuda K., Yasunari T. Cyclone activity associated with the interannual seesaw oscillation of summer precipitation over northern Eurasia // *Global and Planetary Change*. 2007. Vol. 56, No 3–4. P. 387–398.
17. Hiyama T., Fujinami H., Kanamori H., Ishige T., Oshima K. Recent interdecadal changes in the interannual variability of precipitation and atmospheric circulation over northern Eurasia // *Environment Research Letters*. 2016. No 11. doi: 10.1088/1748-9326/11/6/065001.
18. HYSPLIT Trajectories: Air Resources Laboratory. URL: https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php (дата обращения 25.01.2024).
19. Koracin D., Dorman C.E. Marine Atmospheric Boundary Layer Divergence and Clouds along California in June 1996 // *Monthly Weather Review*. 2001. Vol. 129, P. 2040–2056.
20. Papina T.S., Eirikh A.N., Eyrikh S.S. The use of the characteristics of water isotopic composition for assessing the contribution of winter and summer precipitation to the Upper Ob Runoff in the Open-water Period // *Water Resources*. 2024. Vol. 51, No 4, P. 418–427.
21. Yassin Mbululo, Qin Jun, Fatuma Nyihirani, Zhengxuan Yuan, Sijing Huang, Yajuan Wang. Relationship between air pollutant distribution and large-scale circulation // *Environmental Science: Advances*. 2023. No 2. 1119–1129. doi:10.1039/D3VA00060E.

Статья поступила в редакцию: 22.07.24, одобрена после рецензирования: 08.08.24, принята к опубликованию: 12.03.25.

The article was submitted: 22 July 2024; approved after review: 8 August 2024; accepted for publication: 12 March 2025.

Информация об авторах

Надежда Николаевна Безуглова

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, лаборатория физики атмосферно-гидросферных процессов, Институт водных и экологических проблем, Сибирское отделение РАН;

656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

e-mail: bezuglovan@gmail.com

Information about the authors

Nadezhda N. Bezuglova

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Laboratory of Physics of Atmospheric-Hydro-spheric Processes, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Molodezhnaya st., Barnaul, 1656038, Russia

*Метеорология**Безуглова Н.Н., Суковатов К.Ю., Носкова Т.В., Папина Т.С.***Константин Юрьевич Суковатов**

кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, лаборатория физики атмосферно-гидросферных процессов, Институт водных и экологических проблем, Сибирское отделение РАН; 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

e-mail: skonstantiny@gmail.com

Татьяна Витальевна Носкова

кандидат технических наук, научный сотрудник, химико-аналитический центр, Институт водных и экологических проблем, Сибирское отделение РАН; 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

e-mail: ntv@iwep.ru

Татьяна Савельевна Папина

доктор химических наук, начальник химико-аналитического центра, Институт водных и экологических проблем, Сибирское отделение РАН; 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

e-mail: tanya.papina@mail.ru

Konstantin Yu. Sukovатов

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Laboratory of Physics of Atmospheric-Hydro-spheric Processes, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Molodezhnaya st., Barnaul, 1656038, Russia

Tatiana V. Noskova

Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Molodezhnaya str., Barnaul, 1656038, Russia

Tatyana S. Papina

Doctor of Chemical Sciences, Head of the Chemical Analytical Center of the Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Molodezhnaya str., Barnaul, 1656038, Russia

Вклад авторов

Безуглова Н.Н. – подготовка обзора литературы по данному исследованию, интерпретация результатов исследования, написание текста статьи.

Суковатов К.Ю. – сбор и обобщение базы данных, подготовка графического материала, написание текста статьи.

Носкова Т.В. – подготовка обзора литературы по данному исследованию, подготовка графического материала, написание текста статьи.

Папина Т.С. – формулировка идеи, подготовка обзора литературы по данному исследованию, написание текста статьи, научное редактирование текста.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Nadezhda N. Bezuglova – preparation of a literature review on this study, interpretation of the results of the study, writing the text of the article.

Konstantin Yu. Sukovатов – collection and generalization of the database, preparation of graphic material, writing the text of the article.

Tatiana V. Noskova – preparation of a literature review on this study, preparation of graphic material, writing the text of the article.

Tatyana S. Papina – formulation of the idea, preparation of a literature review on this study, writing the text of the article, scientific editing of the text.

The authors declare no conflict of interest.