

УДК 911.2:551.58 (476.5)

UDC 911.2:551.58 (476.5)

**РЕЖИМ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА
В Г. МИНСКЕ****REGIME OF RELATIVE
HUMIDITY AIR IN THE CITY
OF MINSK****А. Н. Витченко,***доктор географических наук, профессор
кафедры геоэкологии БГУ*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0409-6479>;**A. Vitchenko,***Doctor of Sciences in Geography, Professor
of the Department of Geoecology, BSU*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0409-6479>;**И. А. Телеш,***кандидат географических наук,
доцент кафедры инженерной
психологии и эргономики БГУИР***I. Telesh,***Associate Professor,
Department of Engineering Psychology
and Ergonomics, BSUIR*

Поступила в редакцию 18.12.2024.

Received on 18.12.2024.

Анализ средних годовых и месячных характеристик режима относительной влажности воздуха в Минске показал, что в 1980–2022 гг. в городе относительная влажность воздуха характеризуется небольшой межгодовой и значительной сезонной изменчивостью, а также тенденцией к небольшому увеличению ее годовых значений. Средняя годовая относительная влажность воздуха составила 77,3 % при C_v 2,20 %. Количество дней с относительной влажностью воздуха ≥ 80 % отличается умеренной временной изменчивостью и тенденцией к уменьшению их количества. Среднее годовое количество дней с относительной влажностью воздуха ≥ 80 % составило 176 дней, при C_v 9,69 %. Анализ сезонной динамики относительной влажности воздуха в Минске показал, что наиболее высокие ее значения наблюдались зимой и составили 86,0 %, при C_v 1,73 %. Весной относительная влажность воздуха была самой низкой из всех сезонов года 69,6 %, при C_v 4,14 %. Максимальное количество дней с относительной влажностью воздуха ≥ 80 % в разрезе сезонов года наблюдалось зимой – 73 дня, а минимальное летом – 20 дней.

Ключевые слова: относительная влажность, воздух, город, климат, годовой ход, сезонная динамика, прогнозный сценарий.

An analysis of the average annual and monthly characteristics of the relative air humidity regime in Minsk showed that in 1980–2022 in the city, relative air humidity is characterized by small interannual and significant seasonal variability, as well as a tendency to a slight increase in its annual values. The average annual relative air humidity was 77,3 % with a C_v of 2,20 %. The number of days with relative air humidity ≥ 80 % is characterized by moderate temporal variability and a tendency to decrease their number. The average annual number of days with relative air humidity ≥ 80 % was 176 days, with a C_v of 9,69 %. An analysis of the seasonal dynamics of relative air humidity in Minsk showed that its highest values were observed in winter and amounted to 86,0 %, with a C_v of 1,73 %. In spring, relative air humidity was the lowest of all seasons of the year – 69,6 %, with a C_v of 4,14 %. The maximum number of days with relative air humidity ≥ 80 % across seasons was observed in winter – 73 days, and the minimum in summer – 20 days.

Keywords: relative humidity, air, city, climate, annual cycle, seasonal dynamics, forecast scenario.

Введение. Формирование поля влажности воздуха над любой территорией является сложным процессом, на который влияет целый ряд факторов. Он зависит от температуры, водного баланса подстилающей поверхности, ветрового режима и т. д. В крупных городах, характеризующихся преобладанием искусственных поверхностей, интенсивной антропогенной деятельностью и температурными особенностями, как правило, формируется сложное поле влажности, а усредненные ее значения ниже, чем в пригородах и близлежащих сельских районах. Большинство дан-

ных измерений свидетельствуют, что относительная влажность, измеренная на стандартной высоте 2 м, в городе меньше, чем в сельской местности. Это хорошо видно при сравнении результатов одновременных наблюдений в аэропортах, расположенных в городах, и за их пределами [1].

Факторы, которые могут привести к изменению относительной влажности в городах, можно разделить на две группы: 1) факторы, способствующие росту содержания влаги в атмосферном воздухе; 2) факторы, приводящие к понижению влажности воздуха в городах.

К факторам, которые могут повышать относительную влажность в городском воздухе, в первую очередь относится поступление влаги из техногенных источников, включающее утечку из коммуникаций (объем таких потерь составляет 10–20 % от водоснабжения), высвобождение водяного пара и испарение значительного количества воды при промышленных процессах и поступлении влаги за счет сжигания углеводородов (ископаемого топлива), одним из продуктов которого является водяной пар [2]. Например, электростанции выбрасывают из труб на значительную высоту пар и влагу, а у земной поверхности значительное количество водяного пара образуется из выбросов автомобилей.

Среди факторов, приводящих к снижению влажности воздуха в городах, выделяют значительные площади водонепроницаемых поверхностей, уменьшение эвапотранспирации и повышение температуры в городе за счет существования острова тепла. По данным [2], примерно половину величины понижения относительной влажности в городе связывают с существованием на территории города острова тепла. В [3] также указано, что частично пониженные значения относительной влажности в городах являются следствием повышенной температуры внутри острова тепла, а частично связаны с уменьшением эвапотранспирации в городских условиях.

Кроме того, содержание влаги в атмосфере городов зависит от плотности застройки, интенсивности хозяйственной деятельности и природно-климатических условий. Для городов, расположенных в умеренном климате, считается, что отвод атмосферных осадков доминирует над техногенным поступлением влаги в экосистему города и приводит к снижению относительной влажности приземного слоя атмосферы.

В [4] отмечается, что для многих городов различия во влажности воздуха незначительны и чаще всего наблюдаются летом в ясную безветренную погоду. В [5] также отмечается, что отличия суточных циклов характеристик влажности в городе и сельской местности наблюдаются в ясные дни, а в облачные дни влажность в течение суток как в городе, так и в сельской местности меняется мало. Среднее за год значение относительной влажности в городе лишь на 1–2 % ниже, чем в его окрестностях. Если

рассматривать не усредненные данные, а значение относительной влажности в течение суток, то эта разница может составить от 5 до 11 %.

Явление снижения влажности в большом городе получило название «сухого острова» [5]. Исследования показали, что территории с более низкой влажностью не обязательно расположены именно в центральной части города. «Сухие» районы соответствуют жилым кварталам с тесной застройкой без какой-либо растительности и промышленных предприятий.

Интересной особенностью режима влажности в крупных городах умеренного климата является то, что в холодный период абсолютная влажность в пределах города может быть равна ее значению в загородных территориях или даже быть несколько выше. Это вызвано повышенной температурой воздуха в городе и максимальной годовой эмиссией водяного пара [2].

Основная часть. Целью исследования является оценка режима относительной влажности воздуха в городе Минске и определение его возможных изменений. Расчеты основных характеристик относительной влажности воздуха осуществлялись на основе комплексной географической информационной системы геоэкологической оценки комфортности климата [6]. В качестве базовых параметров режима относительной влажности воздуха определялись ее средние, максимальные и минимальные месячные и годовые значения и число дней с относительной влажностью воздуха ≥ 80 %. Так же были выполнены расчеты среднего квадратичного отклонения (σ) и коэффициента вариации (C_v), этих характеристик, которые позволяют объективно оценить изменение режима относительной влажности воздуха в городе. На основе результатов оценки относительной влажности воздуха был разработан сценарий ее возможного изменения до 2040 г. Двадцатилетний лаг прогноза обусловлен периодом выборки исходной информации. При анализе исходной выборки выполнялась процедура проверки «выбросов», далее определялось уравнение регрессии изменения скорости ветра, вычислялось среднее квадратичное отклонение и доверительные интервалы, рассчитывались прогнозные значения [7].

Для характеристики режима относительной влажности воздуха Минска были ис-

пользованы средние суточные данные ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиационного загрязнения и мониторингу окружающей среды» Минприроды Республики Беларусь об относительной влажности воздуха и дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ за 43-летний период (1980–2022 гг.), которые были затем обобщены и интерпретированы с учетом их межгодовой изменчивости и сезонной динамики.

В 1980–2022 гг. относительная влажность воздуха в Минске характеризуется небольшой временной изменчивостью. Средняя годовая относительная влажность воздуха варьировала от 72,6 % в 2002 г. до 79,9 %

в 1989 г. и в среднем составила 77,3 % при C_v 2,20 % (рисунок 1). В рассматриваемый период наблюдается тенденция к небольшому уменьшению средней годовой относительной влажности воздуха.

Количество дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ в 1980–2022 гг. отличается большей временной изменчивостью, чем значения относительной влажности воздуха. Их количество изменялось от 136 в 2002 г. до 204 в 1989 г. и в среднем составило 176 дней при C_v 9,69 % В рассматриваемый период наблюдается тенденция к небольшому уменьшению количества дней в году с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ (рисунок 2).

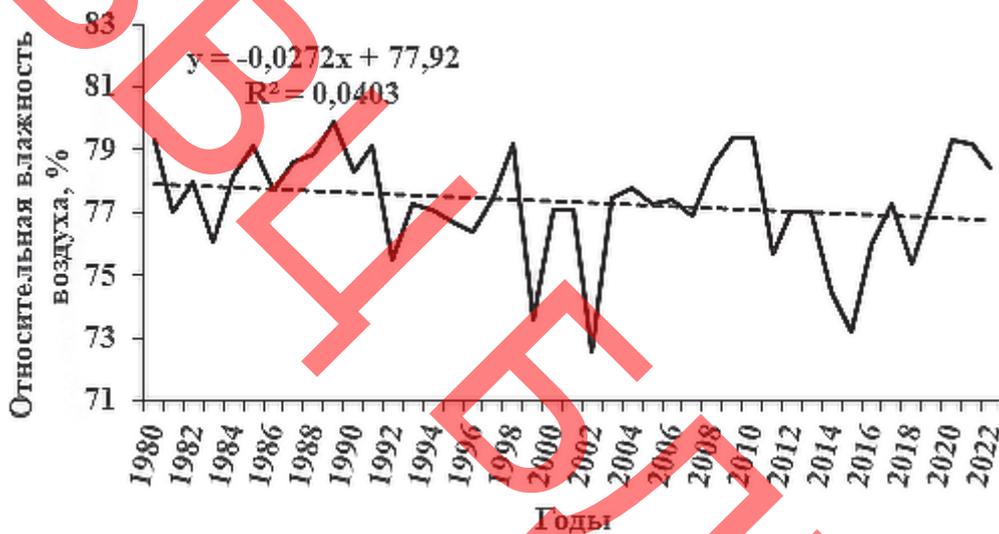


Рисунок 1 – Средние годовые значения относительной влажности воздуха в Минске за период 1980–2022 гг., %

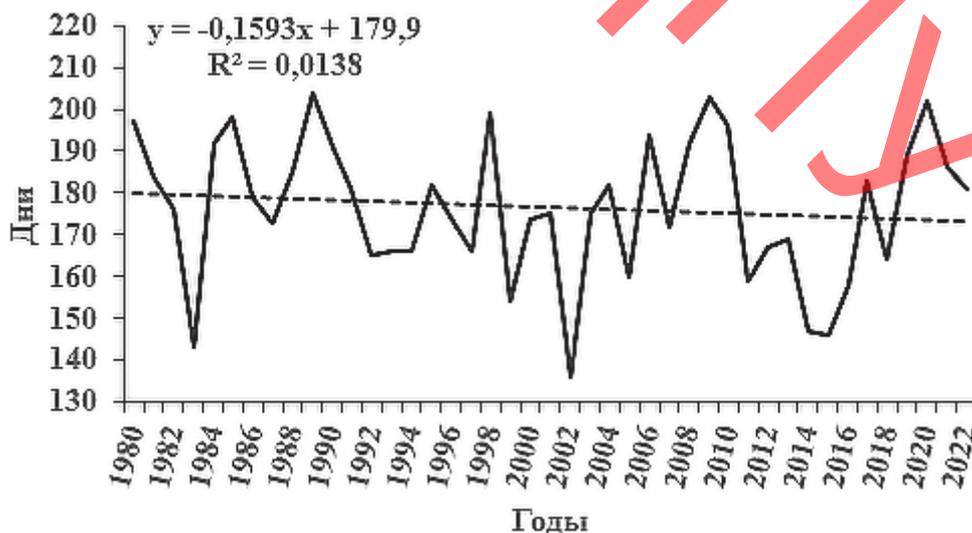


Рисунок 2 – Количество дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ в Минске за период 1980–2022 гг.

Относительная влажность воздуха в Минске имеет хорошо выраженный годовой ход. В среднем ее максимум наблюдается в зимние месяцы, а минимальные значения отмечаются в весенние, достигая минимума в мае. В экстремальные годы годовой ход относительной влажности воздуха имеет более сложный характер, но в основном повторяет ее многолетнее распределение (рисунок 3). В 2002 г. наблюдалась минимальная относительная влажность воздуха, с низкими значениями в весенне-летний период, а в 1989 г. была наибольшая относительная влажность, но ее минимум в годовом ходе отмечался в это же время, хотя и с более высокими абсолютными значениями. В осенне-зимний период 2002 г. и 1989 г. относительная влажность воздуха в основном соответствовала средним значениям за период 1980–2022 гг.

Годовой ход количества дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ хорошо согласуется с годовым ходом относительной влажности воздуха. В среднем их минимум наблюдается в весенние и летние месяцы, а максимальное количество отмечается в ноябре – январе.

В экстремальные годы годовой ход дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ существенно отличается от многолетних значений (рисунок 4). В 2002 г. при минимальной относительной влажности воздуха в основном наблюдалось минимальное количество дней с ее значениями $\geq 80\%$, а в 1989 г., при максимальной относительной влажности воздуха,

количество этих дней превышало средние многолетние значения.

Анализ сезонной динамики относительной влажности воздуха в Минске показал, что наиболее высокие ее значения за период 1980–2022 гг. наблюдались зимой и варьировали от 82,8 % в 1997 г. до 89,3 % в 2009 г. и в среднем составили 86,0 % при C_v 1,73 % (рисунок 5).

Весной минимальная относительная влажность воздуха 63,7 % зафиксирована в 2002 г., максимальная – 74,7 % в 2010 г., а средняя была самой низкой из всех сезонов года 69,6 % при C_v 4,14 %. Осенью минимум относительной влажности воздуха 77,4 % отмечался в 1983 и 2014 гг., максимум – 87,8 % в 2020 г., среднее значение составило 82,8 % при C_v 2,84 %. В летний период минимальная относительная влажность воздуха 59,8 % отмечена в 1992 г., максимальная – 77,6 % в 1998 г., а ее средняя величина составила 71,0 % при C_v 6,13 %.

Месяцем с самой низкой относительной влажностью воздуха за весь исследуемый период был август 2015 г., когда ее значение было 51,9 %, а с самой высокой – декабрь 2018 г., когда относительная влажность воздуха составила 93,1 %.

Максимальное количество дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ за период 1980–2022 гг. в разрезе сезонов года наблюдалось зимой – 73 дня при C_v 6,66 %, осенью было 59 дней при C_v 15,08 %, весной – 24 дня при C_v 26,41 %, а минимальное количество соответствует летнему сезону – 20 дней при C_v 41,85 % (рисунок 6).

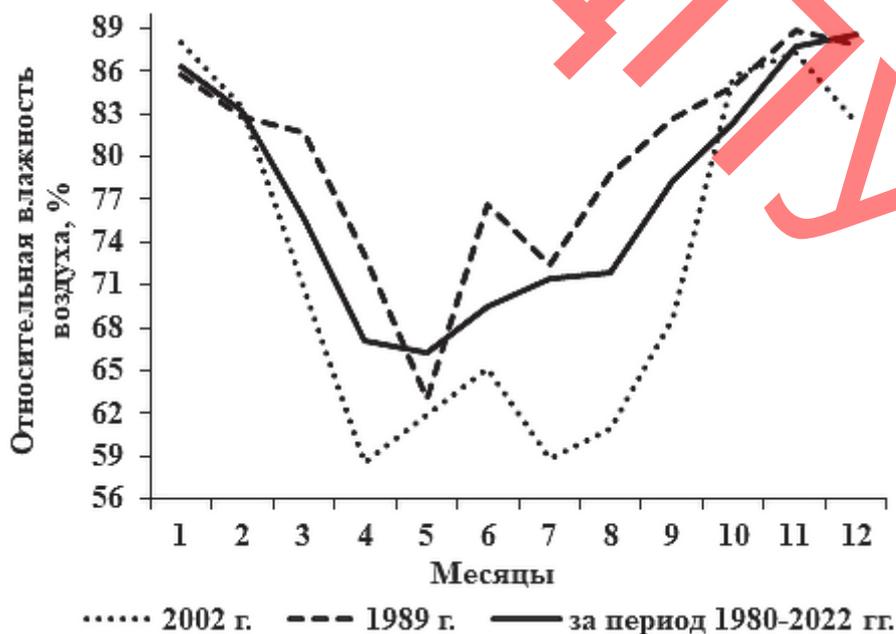


Рисунок 3 – Годовой ход относительной влажности воздуха в Минске в отдельные годы и за период 1980–2022 гг.

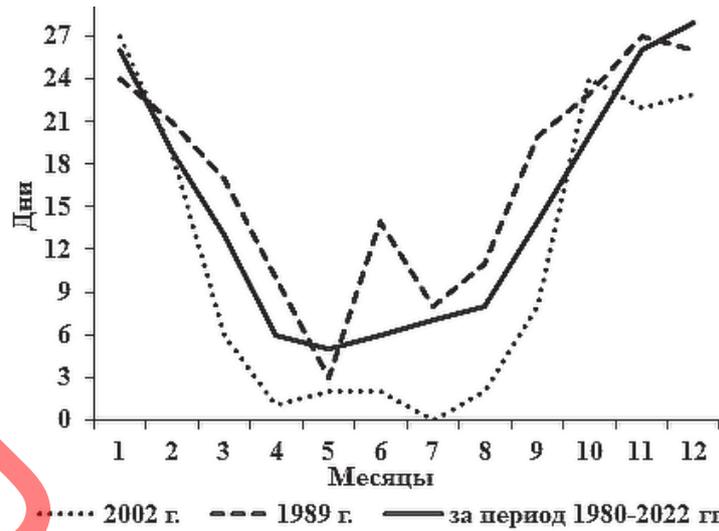


Рисунок 4 – Годовой ход дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ в Минске в отдельные годы и за период 1980–2022 гг.

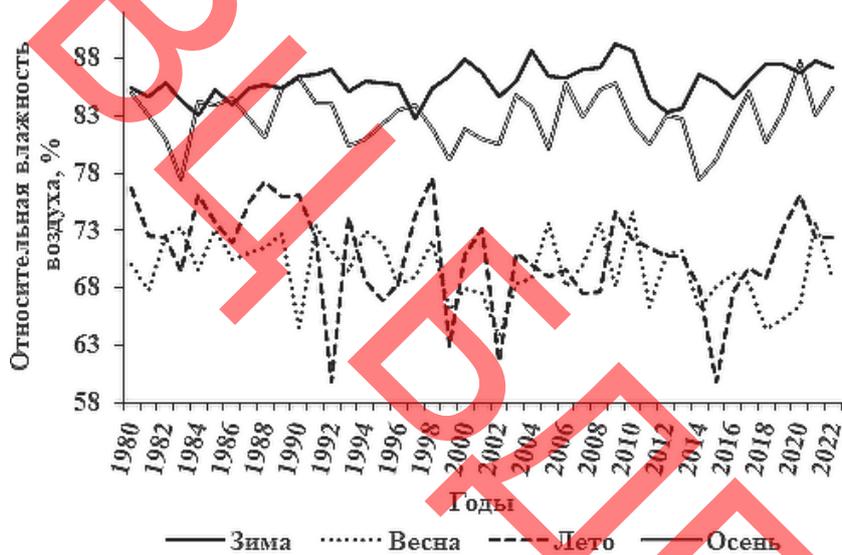


Рисунок 5 – Сезонная динамика относительной влажности воздуха в Минске за период 1980–2022 гг.

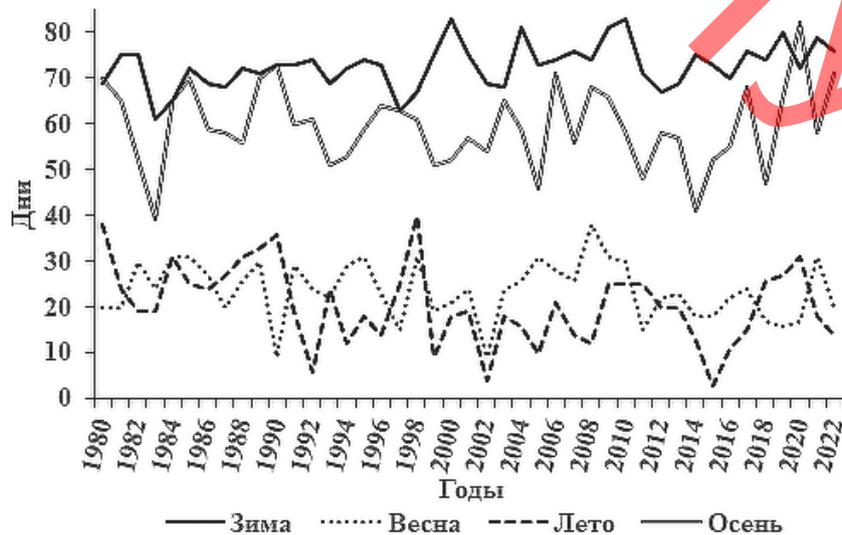


Рисунок 6 – Сезонная динамика дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ в Минске за период 1980–2022 гг.

Таблица 1 – Изменение относительной влажности воздуха (%) и дней с относительной влажностью $\geq 80\%$ в Минске согласно возможному сценарию на 2040 г.

Показатель	Временная функция (рассчитана по уравнению регрессии)	Стандартное отклонение, d	Доверительный интервал при p ($\alpha = 0,05$)	Среднее за 1980–2022 гг.	Значение в 2040 г.
Относительная влажность воздуха	$y = -0,0272x + 77,92$	1,70	$\pm 0,51$	77,3	76,3
Количество дней	$y = -0,1593x + 179,9$	17,05	$\pm 5,10$	176,4	170,3

Изучение динамики относительной влажности воздуха и количества дней с относительной влажностью $\geq 80\%$ за 1980–2022 гг. позволило разработать прогнозный сценарий их возможного изменения в Минске до 2040 г., согласно которому в городе возможно небольшое уменьшение средней годовой относительной влажности воздуха и количества дней с относительной влажностью $\geq 80\%$ (таблица 1).

Заключение. Анализ средних годовых и месячных характеристик режима относительной влажности воздуха в Минске показал, что в 1980–2022 гг. в городе относительная влажность воздуха характеризуется небольшой межгодовой и значительной сезонной изменчивостью, а также тенденцией к небольшому увеличению ее годовых значений. Средняя годовая относительная влажность воздуха варьировала от 72,6 % в 2002 г. до 79,9 % в 1989 г. и в среднем составила 77,3 % при C_v 2,20 %. Количество дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ в 1980–2022 гг. отличается умеренной временной изменчивостью и тенденцией к уменьшению их количества. Количество дней в году с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ изменялось от 136 дней в 2002 г. до 204 дней в 1989 г. и в среднем составило 176 дней при C_v 9,69 %. Относительная влажность воздуха в Минске имеет хорошо выраженный годовой ход. Ее максимум наблюдается в зимние месяцы, а минимальные значения отмечаются в весенние, достигая минимума в мае.

Годовой ход количества дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ хорошо согласуется с годовым ходом относительной влажности воздуха. Их минимум наблюдается в весенние и летние месяцы, а максимальное количество отмечается в ноябре – январе. Анализ сезонной динамики относительной влажности воздуха в Минске показал, что наиболее высокие ее значения за период 1980–2022 гг. наблюдались зимой и составили 86,0 % при C_v 1,73 %. Весной относительная влажность воздуха была самой низкой из всех сезонов года 69,6 % при C_v 4,14 %. Осенью она была 82,8 % при C_v 2,84 %. В летний период ее величина составила 71,0 мм при C_v 6,13 %. Месяцем с самой низкой относительной влажностью воздуха за весь исследуемый период был август 2015 г., когда ее значение было 51,9 %, а с самой высокой – декабрь 2018 г., когда относительная влажность воздуха составила 93,1 %. Максимальное количество дней с относительной влажностью воздуха $\geq 80\%$ за период 1980–2022 гг. в разрезе сезонов года наблюдалось зимой – 73 дня, осенью было 59 дней, весной – 24 дня, а минимальное количество соответствует летнему сезону – 20 дней. Проведенные исследования могут быть полезны в практике рационального использования естественных ресурсов города Минска при планировании и проектировании природопользования для его устойчивого развития и оптимизации среды жизнедеятельности населения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Landsberg, H. E. The Urban Climate / H. E. Landsberg. – New York : Academic Press, 1981. – 275 p.
2. Город, архитектура, человек и климат / М. С. Мягков, Ю. Д. Губернский, Л. И. Конохова, В. К. Лицкевич [и др.] ; под ред. М. С. Мягкова. – М. : Архитектура-С, 2007. – 344 с.

REFERENCES

1. Landsberg, H. E. The Urban Climate / H. E. Landsberg. – New York : Academic Press, 1981. – 275 p.
2. Gorod, arhitektura, chelovek i klimat / M. S. Myagkov, Yu. D. Gubernskij, L. I. Konohova, V. K. Lickevich [i dr.] ; pod red. M. S. Myagkova. – M. : Arhitektura-S, 2007. – 344 s.

3. *Landsberg, H. E.* Micrometeorological observations in area of urban growth / H. E. Landsberg, T. N. Maisel // *Boundary-Layer Meteorology*, 1972. Vol. 1. – P. 79–83.
4. *Richards, K.* Urban and rural dewfall, surface moisture, and associated canopy-level air temperature and humidity measurements for Vancouver, Canada / K. Richards // *Boundary-Layer Meteorology*, 2005. Vol. 114. – P. 143–163.
5. *Hilberg, S. D.* Diurnal temperature and moisture cycles / S. D. Hilberg // *State Water Survey Bulletin*, 1978. Vol. 2, No. 63. – P. 25–42.
6. *Витченко, А. Н.* Геоэкологическая оценка комфортности климата крупных городов Беларуси / А. Н. Витченко, И. А. Телеш // *Вестник БГУ. Сер. 2, Химия, Биология, География*. – 2011. – № 2. – С. 73–78.
7. *Лудерер, Б.* Высшая математика в экономике, технике, информатике : справочник / Б. Лудерер, Ф. Ноллау, К. Феттерс; авториз. пер. с нем. Б. Лудерера; науч. ред. пер. А. В. Самусенко, В. В. Казаченок. – Минск : Высшая шк., 2005. – 279 с.
3. *Landsberg, H. E.* Micrometeorological observations in area of urban growth / H. E. Landsberg, T. N. Maisel // *Boundary-Layer Meteorology*, 1972. Vol. 1. – P. 79–83.
4. *Richards, K.* Urban and rural dewfall, surface moisture, and associated canopy-level air temperature and humidity measurements for Vancouver, Canada / K. Richards // *Boundary-Layer Meteorology*, 2005. Vol. 114. – P. 143–163.
5. *Hilberg, S. D.* Diurnal temperature and moisture cycles / S. D. Hilberg // *State Water Survey Bulletin*, 1978. Vol. 2, No. 63. – P. 25–42.
6. *Vitchenko, A. N.* Geoekologicheskaya ocenka komfortnosti klimata krupnyh gorodov Belarusi / A. N. Vitchenko, I. A. Telesh // *Vestnik BGU. Ser. 2, Himiya, Biologiya, Geografiya*. – 2011. – № 2. – S. 73–78.
7. *Luderer, B.* Vysshaya matematika v ekonomike, tekhnike, informatike : spravochnik / B. Luderer, F. Nollau, K. Fetters; avtoriz. per. s nem. B. Luderera; nauch. red. per. A. V. Samusenko, V. V. Kazachenok. – Minsk : Vysshaya shk., 2005. – 279 s.