

УДК 911.2:551.58 (476.5)

## ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В КРУПНОМ ГОРОДЕ

А. Н. ВИТЧЕНКО <sup>1\*</sup>, И. А. ТЕЛЕШ <sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет (БГУ), Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники (БГУИР), Минск, Беларусь

Анализ средних годовых и месячных характеристик режима относительной влажности воздуха (ОВВ) в г. Минск показал, что в 1980–2022 гг. ОВВ характеризуются небольшой межгодовой и значительной сезонной изменчивостью, а также тенденцией к небольшому увеличению ее годовых значений. Средняя годовая ОВВ составила 77,3% при  $C_v$  2,20%. Количество дней с ОВВ  $\geq 80\%$  отличается умеренной временной изменчивостью и тенденцией к уменьшению их количества. Среднее годовое количество дней с ОВВ  $\geq 80\%$  составило 176 дней при  $C_v$  9,69%. Анализ сезонной динамики ОВВ в Минске показал, что наиболее высокие ее значения наблюдались зимой и составили 86,0% при  $C_v$  1,73%. Весной ОВВ была самой низкой из всех сезонов года – 69,6% при  $C_v$  4,14%.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.210>

**Keywords:** relative air humidity, city, climate, forecast scenario.

**Введение.** В XXI в. проблема изменения климата привлекла к себе внимание всего мирового сообщества и побудила рассматривать климат как важнейший природный ресурс, пространственно-временные вариации которого имеют серьезные социально-экономические и политические последствия, определяющие благосостояние государств мира. Также в настоящее время уделяется значительное внимание проблеме урбанизации – возникновению и постоянному увеличению площади и численности населения городов, процессам формирования городских ландшафтов и многим другим вопросам их развития, требующим квалифицированного решения в теории и практике управления городами. В связи с этим исследование изменения климатических условий городов является актуальным и имеет фундаментальное и прикладное значение, являясь составной частью комплексной оценки геоэкологического потенциала среды жизнедеятельности населения урбанизированных территорий.

**Цель и объект исследования.** Объектом исследования является крупный город. Основная цель исследования – оценка режима относительной

\* E-mail: [dr.vitchenko@rambler.ru](mailto:dr.vitchenko@rambler.ru)

\*\* E-mail: [tia32@bsuir.by](mailto:tia32@bsuir.by)

влажности воздуха (ОВВ) крупного города и определение его возможных изменений на примере города Минск.

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 данных измерений свидетельствуют, что ОВВ, 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 ОВВ 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 [3], примерно половину величины понижения ОВВ в городе связывают с существованием на территории города острова тепла. В [3] также указано, что частично пониженные значения ОВВ в городах являются следствием повышенной температуры внутри острова тепла, а частично – 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 ОВВ 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 ОВВ в городе лишь на 1–2% ниже, чем в его окрестностях. Если рассматривать не усредненные данные, а значение ОВВ 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].

**Материалы и методы исследования.** Для характеристики режима ОВВ г. Минск были использованы средние суточные данные ГУ “Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиационного загрязнения и мониторингу окружающей среды” Минприроды Республики Беларусь об ОВВ и дней с  $ОВВ \geq 80\%$  за 43-летний период (1980–2022 гг.), которые затем были обобщены и интерпретированы с учетом их межгодовой изменчивости и сезонной динамики.

Расчеты основных характеристик ОВВ осуществлялись на основе комплексной географической информационной системы геоэкологической оценки комфортности климата [6]. В качестве базовых параметров режима ОВВ определялись ее средние, максимальные и минимальных месячные и годовые значения и число дней с  $ОВВ \geq 80\%$ . Также были выполнены расчеты среднего квадратичного отклонения ( $\sigma$ ) и коэффициента вариации ( $C_v$ ) этих характеристик, которые позволяют объективно оценить изменение режима ОВВ в городе. На основе результатов оценки 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].

**Результаты исследований и их обсуждение.** В 1980–2022 гг. ОВВ в Минске характеризуется небольшой временной изменчивостью. Средняя годовая ОВВ варьировала от 72,6% в 2002 г. до 79,9% в 1989 г. и в среднем составила 77,3% при  $C_v$  2,20% (рис. 1). В рассматриваемый период наблюдается тенденция к небольшому уменьшению средней годовой ОВВ.

Количество дней с  $ОВВ \geq 80\%$  в 1980–2022 гг. отличается большей временной изменчивостью, чем значения ОВВ. 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  $ОВВ \geq 80\%$  (рис. 2).

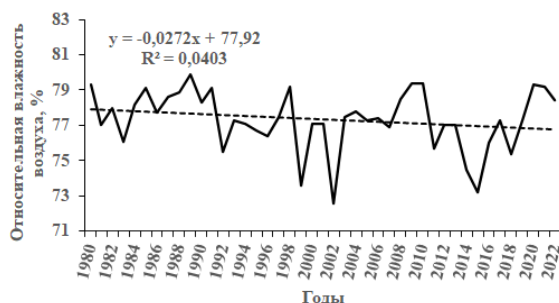


Рис. 1. Средние годовые значения относительной влажности воздуха в Минске за период 1980–2022 гг.

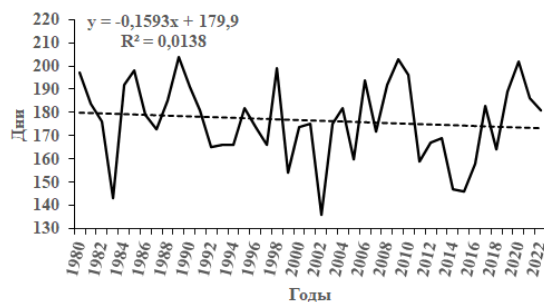


Рис. 2. Количество дней с относительной влажностью воздуха  $\geq 80\%$  в Минске за период 1980–2022 гг.

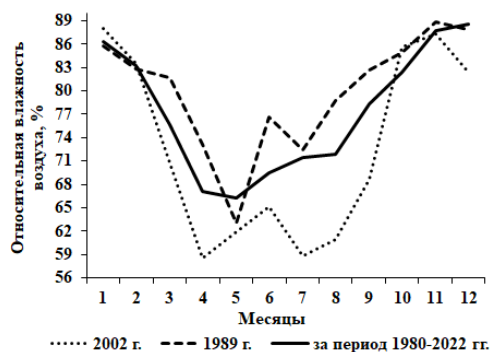


Рис. 3. Годовой ход относительной влажности воздуха в Минске в отдельные годы и за период 1980–2022 гг.

ся от многолетних значений (рис. 4). В 2002 г. при минимальной ОВВ в основном наблюдалось минимальное количество дней с ее значениями  $\geq 80\%$ , а в 1989 г. при максимальной ОВВ количество этих дней превышало средние многолетние значения.

Анализ сезонной динамики ОВВ 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% (рис. 5).

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 ОВВ имеет более сложный характер, но в основном повторяет ее многолетнее распределение (рис. 3). В 2002 г. наблюдалась минимальная ОВВ, с низкими значениями в весенне-летний период, а в 1989 г. была наибольшая ОВВ, 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. ОВВ в основном соответствовала средним значениям за период 1980–2022 гг.

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

В экстремальные годы годовой ход дней с ОВВ  $\geq 80\%$  существенно отличается

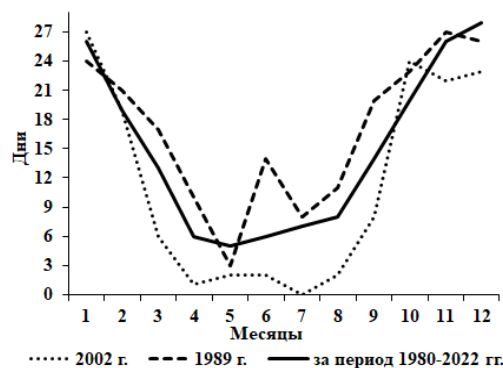


Рис. 4. Годовой ход дней с относительной влажностью воздуха  $\geq 80\%$  в Минске в отдельные годы и за период 1980–2022 гг.

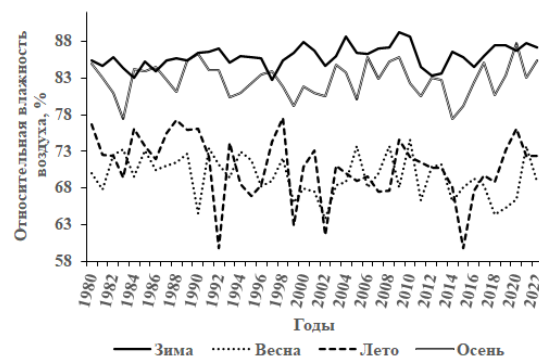


Рис. 5. Сезонная динамика относительной влажности воздуха в Минске за период 1980–2022 гг.

Весной минимальная ОВВ=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 г. и 2014 г., максимум – 87,8% в 2020 г., среднее значение составило 82,8% при  $C_v$  2,84%. В летний период минимальная ОВВ = 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 ОВВ за весь исследуемый период был август 2015 г., когда ее значение было 51,9%, а с самой высокой – декабрь 2018 г., когда ОВВ составила 93,1%.

Максимальное количество дней с ОВВ  $\geq 80\%$  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%.

Изменение ОВВ (%) и дней с ОВВ  $\geq 80\%$  в Минске согласно возможного сценария на 2040 г.

Показатель	Временная функция (рассчитана по уравнению регрессии)	Стандартное отклонение, $\delta$	Доверительный интервал $p$ при $\alpha=0,05$	Среднее за 1980–2022 гг.	Значение в 2040 г.
ОВВ	$y = -0,0272x + 77,92$	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

**Заключение.** Анализ средних годовых и месячных характеристик режима ОВВ в Минске показал, что в 1980–2022 гг. в городе ОВВ характеризуются небольшой межгодовой и значительной сезонной изменчивостью, а также тенденцией к небольшому увеличению ее годовых значений. Средняя годовая ОВВ 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 ОВВ  $\geq 80\%$  в 1980–2022 гг. отличается умеренной временной изменчивостью и тенденцией к уменьшению их количества. Количество дней в году с ОВВ  $\geq 80\%$  изменялось от 136 дней в 2002 г. до 204 дней в 1989 г. и в среднем составило 176 дней при  $C_v$  9,69%. ОВВ 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 ОВВ  $\geq 80\%$  хорошо согласуется с годовым ходом ОВВ. Их минимум наблюдается в весенние и летние месяцы, а максимальное количество отмечается в ноябре–январе. Анализ сезонной динамики ОВВ 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 ОВВ 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% при  $C_v$  6,13%. Месяцем с самой низкой ОВВ за весь исследуемый период был август 2015 г., когда ее значение было 51,9%, а с самой высокой – декабрь 2018 г., когда ОВВ составила 93,1%. Максимальное количество дней с ОВВ  $\geq 80\%$  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 использованы в практике рационального использования природных ресурсов города Минска при планировании и проектировании природопользования для его устойчивого развития и оптимизации среды жизнедеятельности населения.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 21.05.2025

Утверждена 15.08.2025

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Landsberg H.E. *The Urban Climate*. New York, Academic Press (1981), 275.
2. Мягков М.С., Губернский Ю.Д. и др. *Город, архитектура, человек и климат*. Москва, Архитектура-С (2007), 344.
3. Landsberg H.E., Maisel T.N. Micrometeorological Observations in Area of Urban Growth. *Boundary-Layer Meteorology* **1** (1972), 79–83.
4. Richards K. Urban and Rural Dewfall, Surface Moisture, and Associated Canopy-Level Air Temperature and Humidity Measurements for Vancouver, Canada. *Boundary-Layer Meteorology* **114** (2005), 143–163.  
<https://doi.org/10.1007/s10546-004-8947-7>
5. Hilberg S.D. Diurnal Temperature and Moisture Cycles. *State Water Survey Bulletin* **2** (1978), 25–42.
6. Витченко А.Н., Телеш И.А. Геоэкологическая оценка комфортности климата крупных городов Беларуси. *Вестник БГУ. Сер.2: Химия, Биология, География* **2** (2011), 73–78.
7. Лудерер Б., Ноллау Ф., Феттерс К. *Высшая математика в экономике, технике, информатике. Справочник*. Минск, Высшая школа (2005), 279.

Ա. Ն. ՎԻՏՉԵՆԿՈ, Ի. Ա. ՏԵԼԵՇ

ՕՂԻ ՀԱՐԱՔԵՐԱԿԱՆ ԽՈՆԱՎՈՒԹՅԱՆ ՌԵԺԻՄԻ  
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ՄԵԾ ԶԱՂԱՔՈՒՄ

## Ամփոփում

Մինսկում օղի հարաբերական խոնավության ռեժիմի միջին տարեկան և ամսական բնութագրերի վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ 1980–2022 թվականներին քաղաքում օղի հարաբերական խոնավությունը բնութագրվում է միջտարեկան ոչ մեծ և սեզոնային զգալի փոփոխությամբ, ինչպես նաև տարեկան արժեքների աննշան աճման միտումով: Օղի տարեկան միջին հարաբերական խոնավությունը կազմել է 77,3%՝  $C_v$ -ն 2,20% պայմաններում:  $\geq 80\%$  հարաբերական խոնավությամբ օրերի թիվը բնութագրվում է ժամանակային չափավոր փոփոխությամբ և դրանց թվի նվազման միտումով:  $\geq 80\%$  հարաբերական խոնավությամբ տարեկան միջին օրերի թիվը կազմել է 176 օր՝  $C_v$ -ն 9,69% պայմաններում: Մինսկում օղի հարաբերական խոնավության սեզոնային դինամիկայի վերլուծությունը ցույց է տալիս, որ դրա ամենամեծ արժեքները դիտվում են ձմռանը՝ կազմելով 86,0%, իսկ  $C_v$ -ն՝ 1,73%: Գարնանը օղի հարաբերական խոնավությունը տարվա բոլոր սեզոնների համեմատ ամենափոքրն է՝ 69,6%, իսկ  $C_v$ -ն 4,14% է:

A. N. VITCHENKO, I. A. TELESK

FEATURES OF RELATIVE AIR HUMIDITY REGIME  
IN A LARGE CITY

## Summary

An analysis of the average annual and monthly characteristics of the relative air humidity (RAH) regime in the Minsk City showed that in 1980–2022. In the City, RAH 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 RAH was 77.3% with a  $C_v$  of 2.20%. The number of days with RAH  $\geq 80\%$  is characterized by moderate temporal variability and a tendency to decrease their number. The average annual number of days with RAH  $\geq 80\%$  was 176 days, with a  $C_v$  of 9.69%. An analysis of the seasonal dynamics of RAH 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, RAH was the lowest of all seasons of the year – 69.6%, with a  $C_v$  of 4.14%.