

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ  
КОМФОРТНОСТИ КЛИМАТА В ГОРОДЕ МИНСКЕА. Н. ВИТЧЕНКО<sup>1)</sup>, И. А. ТЕЛЕШ<sup>2)</sup><sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Беларусь

Проведена оценка изменения комфортности климата в городе Минске. Методика исследования базируется на выполненном с использованием современных ГИС-технологий расчете частных и интегральных эколого-климатических показателей состояния окружающей среды, характеризующих степень ее благоприятности для человека. Проанализированы 8 основных климатических и 15 эколого-климатических параметров Минска за 1980–2015 гг. Сделаны выводы о том, что в городе отмечалась устойчивая тенденция к повышению количества дней с нормальной эквивалентно-эффективной температурой воздуха от 17 до 21 °С и среднемесячной температуры воздуха в июле и январе, а также интегрального показателя комфортности климата. Установлено, что тенденция к снижению характерна для продолжительности периода с индексом холодового стресса по Хиллу  $\geq 4,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·с) и количества случаев с контрастными изменениями погоды; количества дней с межсуточным изменением атмосферного давления  $\geq 9$  гПа/сут, относительной влажностью воздуха  $\geq 80$  %, холодных дней с температурой воздуха  $\leq -10$  °С, дискомфортными значениями облачности  $\geq 6$  баллов, скоростью ветра  $\geq 5$  м/с, осадками  $\geq 1$  мм. Выявлено, что в Минске на протяжении 1980–2015 гг. преобладали умеренно комфортные (61 %) и малокомфортные (36 %) климатические условия; отмечается устойчивая тенденция к улучшению климата города. Предложен прогнозный сценарий возможного изменения комфортности климата в Минске до 2030 г. Полученные результаты могут быть использованы в практике рационального природопользования для принятия грамотных управленческих решений по оптимизации функционирования и развития белорусской столицы с учетом возможных вариаций климата.

**Ключевые слова:** геоэкология; город; здоровье; жизнедеятельность; комфортность; климат; моделирование; население; прогнозный сценарий; человек.

CURRENT TRENDS OF THE CLIMATIC  
COMFORT CHANGE IN MINSKA. N. VITCHENKO<sup>a</sup>, I. A. TELESH<sup>a</sup><sup>a</sup>Belarusian State University, Niezaliežnasci Avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus<sup>b</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Broŭki Street, 6, 220013, Minsk, Belarus

Corresponding author: A. N. Vitchenko (dr.vitchenko@rambler.ru)

Estimation of the change the climatic comfort in Minsk founded on methods of the calculation the separate and integral eco-climatic indices of the condition environment, characterizing degree its favourable for person, with use modern GIS-technology are executed. The analysis of the main climatic (8) and eco-climatic (15) indices in Minsk during

**Образец цитирования:**

Витченко А. Н., Телеш И. А. Современные тенденции изменения комфортности климата в городе Минске // Журн. Белорус. гос. ун-та. География. Геология. 2017. № 2. С. 103–113.

**For citation:**

Vitchenko A. N., Telesh I. A. Current trends of the climatic comfort change in Minsk. *J. Belarus. State Univ. Geogr. Geol.* 2017. No. 2. P. 103–113 (in Russ.).

**Авторы:**

**Александр Николаевич Витченко** – доктор географических наук, профессор; заведующий кафедрой геоэкологии географического факультета.

**Инна Анатольевна Телеш** – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры экологии факультета компьютерного проектирования.

**Authors:**

**Alexander Vitchenko**, doctor of science (geography), full professor; head of the department of geoecology, faculty of geography.

dr.vitchenko@rambler.ru

**Inna Telesh**, PhD (geography), docent; associate professor at the department of ecology, faculty of computer-aided design.

teleshinna@rambler.ru

1980–2015 was shown in city stable trend to increasing amount days with orderly equivalent-efficient temperature of the air from 17 before 21 °C and average month temperature of the air at July and January, of the integral index of the climatic comfort. The trend to reduction typical for length of the period with index cold stress by Hill  $\geq 4,5 \text{ Wt}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  and amount of the events with contrasting change the weather; decreases the amount of the days with between daily of change the atmospheric pressure  $\geq 9 \text{ GPa-day}$ , relative moisture of the air  $\geq 80 \%$ , cold days with the temperature of the air  $\leq -10 \text{ }^\circ\text{C}$ , with not comfort importances of cloud  $\geq 6$  points, with the speed of winds  $\geq 5 \text{ m/s}$ , with precipitation  $\geq 1 \text{ mm}$ . In Minsk in 1980–2015 dominated moderate comfort (61 %) and little comfort (36 %) climatic conditions and exists the stable trend to improvement of the climate of the city. Prognosis scenario of the possible climate comfort change in Minsk before 2030 is offered. The received results can be used in practice of rational environmental management for adoption of competent administrative decisions on optimization of functioning and development of Minsk taking into account possible variations of climate.

**Key words:** geocology; city; health; vital activity; comfort; climate; modeling; population; prognosis scenario; person.

## Введение

В XXI в. проблема изменения климата привлекла внимание всего мирового сообщества и побудила рассматривать его как важнейший природный ресурс, пространственно-временные вариации которого имеют серьезные социально-экономические и политические последствия, определяющие благосостояние государств. В настоящее время остро стоит и проблема урбанизации, связанная с постоянным увеличением площади и численности населения городов, процессами формирования городских ландшафтов и многими другими вопросами их развития, требующими квалифицированного решения в теории и практике управления городами. По этой причине исследование климатических условий городов представляется весьма актуальным, имеет фундаментальное и прикладное значение и является составной частью комплексной оценки геоэкологического потенциала среды жизнедеятельности населения урбанизированных территорий.

Основная цель настоящего исследования – геоэкологическая оценка комфортности климата города Минска и определение возможных тенденций ее изменения. Под геоэкологической оценкой комфортности климата города авторы понимают выявление степени его благоприятности по отношению к организму человека с учетом естественного потенциала самоочищения атмосферы и воздействия климата на режим эксплуатации жилых сооружений.

## Методика исследования

Анализ литературных источников и собственные исследования авторов позволили разработать оригинальную методику геоэкологической оценки комфортности климата городов [1]. Расчет частных и интегральных эколого-климатических показателей (ЭКП) состояния окружающей среды, характеризующих степень ее благоприятности для человека, выполнен на основе математического моделирования природно-антропогенных процессов и применения современных ГИС-технологий.

Использовать все факторы при оценке комфортности климата не представляется возможным по причине их большого количества. Следовательно, необходимо выделить наиболее значимые из них с учетом весовых коэффициентов. Для оценки комфортности климата городов была разработана 5-балльная шкала ранжирования эколого-климатических параметров. Высший балл соответствует оптимальным ЭКП в пределах городов, низший – наименее благоприятным. Для каждого показателя учитывался коэффициент значимости  $F$ , отражающий вклад отдельного фактора в общий показатель комфортности климата. Так,  $F = 2$  присваивался наименее значимым показателям;  $F = 5$  – самым существенным.

К наиболее значимым показателям комфортности климата городов относится индекс изменчивости погоды  $K_{\text{ин}}$ . Методика его определения учитывает контрастную смену погоды. Основанием для выявления факта смены периодов с однотипной погодой являются следующие изменения:

- ясной и облачной погоды – на погоду с осадками;
- ясной погоды – на облачную (и наоборот) – при межсуточной амплитуде температуры воздуха  $\geq 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- любой погоды при межсуточной амплитуде температуры воздуха  $\geq 6 \text{ }^\circ\text{C}$  [2].

Индекс изменчивости погоды вычисляется по формуле

$$K_{\text{ин}} = M_{\text{к}} / N \cdot 100,$$

где  $K_{\text{ин}}$  – индекс изменчивости погоды, %;  $M_{\text{к}}$  – число контрастных смен периодов с однотипной погодой;  $N$  – число дней в году. Показатель изменчивости погоды на территории Беларуси достигает нижнего предела сильноизменчивой погоды ( $\geq 50 \%$ ). В этом случае происходит смена погоды через

день и физиологические механизмы адаптации метеочувствительных людей не в состоянии обеспечить приспособление организма к новым погодным условиям. Данному показателю соответствует коэффициент значимости  $F = 5$ .

Для характеристики дискомфорта зимнего периода был использован индекс холодного стресса по [3]:

$$H_w = (0,13 + 0,47v^{0,5}) \cdot (36,6 - t) + (0,085 + 0,102v^{0,3}) \cdot (61,1 - e)^{0,75},$$

где  $H_w$  – индекс холодного стресса, Вт/(м<sup>2</sup>·с);  $v$  – скорость ветра, м/с;  $t$  – температура воздуха, °С;  $e$  – упругость водяного пара, мб. Согласно методике оценки холодного стресса погоды [4] климатические условия с показателем  $H_w \geq 4,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·с) характеризуются как дискомфортные. Они регистрируются в Беларуси достаточно часто, а в отдельные годы достигают уровня абсолютно дискомфортных ( $H_w \geq 8,0$  Вт/(м<sup>2</sup>·с)), что значительно ограничивает комфортность климата зимой и определяет высокую степень значимости данного показателя ( $F = 5$ ).

При оценке комфортности климата интерес представляет повторяемость оптимальных погодных условий теплого периода. Нормальные эквивалентно-эффективные температуры (НЭЭТ) отражают воздействие на человека совокупности метеорологических условий и рассчитываются по формуле согласно [5; 6]

$$\text{НЭЭТ} = 37 - (37 - t) / [(0,68 - 0,0014f + 1/1,76 + 1,4v^{0,75} - 0,29t)(1 - f/100)],$$

где  $t$  – среднесуточная температура воздуха, °С;  $f$  – относительная влажность воздуха, %;  $v$  – среднесуточная скорость ветра, м/с. По повторяемости значений НЭЭТ от 17 до 22 °С определяют продолжительность наиболее комфортного периода в теплое время года. Чем больше климатические условия отличаются от оптимальных, тем короче период с НЭЭТ 17–22 °С. Повторяемость погоды с комфортными НЭЭТ  $\leq 30$  % от числа дней теплого периода считается минимальной. В Беларуси продолжительность периода с оптимальными НЭЭТ составляет около  $\leq 25$  %, что снижает благоприятность климата для метеочувствительных людей и обуславливает значительный вес фактора при оценке комфортности климата городов ( $F = 5$ ).

Важное значение при оценке комфортности климата имеет повторяемость неблагоприятной погоды в межсезонные периоды, которая критична для метеочувствительных людей и часто вызывает у них обострение хронических заболеваний. Это относится прежде всего к повторяемости резко холодной погоды, формирующейся при температуре от 0 до 5 °С, в сочетании с высокой влажностью воздуха и скоростью ветра от 4 до 15 м/с [2]. Вероятность таких погодных условий в Беларуси составляет более 80 %, что обуславливает весомый вклад показателя в комфортность климата ( $F = 5$ ).

Коэффициент значимости, равный 4, был присвоен ряду показателей комфортности климата, которые неблагоприятно влияют на здоровье населения и сильно варьируют на территории Беларуси, в отдельных районах достигая  $\geq 50$  % от числа дней рассматриваемого периода. К ним относятся следующие показатели, обозначающие количество дней:

- душных с  $t \geq 20$  °С,  $f \geq 80$  % –  $K_{\text{дд}}$ ;
- холодных с  $t \leq -15$  °С –  $K_{\text{хд}}$ ;
- с межсуточным изменением атмосферного давления  $\geq 10$  мб/сут –  $K_{\text{ад}}$ ;
- с относительной влажностью воздуха  $\geq 80$  % –  $K_{\text{овв}}$ .

Существенное влияние на комфортность климата городов оказывают количество дней со скоростью ветра  $\geq 6$  м/с ( $K_{\text{св}}$ ), осадками  $\geq 1$  мм ( $K_{\text{ос}}$ ), облачностью  $\geq 5$  баллов ( $K_{\text{об}}$ ), а также климатический потенциал самоочищения атмосферы ( $K_{\text{кпс}}$ ) и продолжительность комфортного периода эксплуатации жилых сооружений ( $K_{\text{эжс}}$ ), которым был присвоен коэффициент значимости  $F = 3$ . Климатический потенциал самоочищения атмосферы определялся по формуле, предложенной Т. С. Селегей и И. П. Юрченко [7]:

$$K_{\text{кпс}} = (P_{\text{ш}} + P_{\text{т}}) / (P_{\text{о}} + P_{\text{в}}),$$

где  $K_{\text{кпс}}$  – климатический потенциал самоочищения атмосферы, балл;  $P_{\text{ш}}$  – число дней со штилем;  $P_{\text{т}}$  – число дней с туманами;  $P_{\text{о}}$  – число дней с осадками ( $\geq 0,5$  мм);  $P_{\text{в}}$  – число дней с сильным ветром ( $\geq 6$  м/с). Чем больше абсолютная величина  $K_{\text{кпс}}$ , тем хуже условия для рассеивания вредных веществ в атмосфере. Если  $K_{\text{кпс}} \leq 1$ , то повторяемость процессов, способствующих самоочищению атмосферы, преобладает над повторяемостью процессов, ведущих к накоплению вредных примесей в ней, что улучшает условия для жизни и отдыха людей, особенно при значительных антропогенных нагрузках ( $F = 3$ ).

Продолжительность комфортного периода эксплуатации жилых сооружений определялась с учетом влияния на них температуры и влажности воздуха [8]. В данном случае под комфортной погодой понималась такая, при которой для сохранения благоприятных условий в помещениях не требуется ни отопления, ни охлаждения, а воздухообмен поддерживается естественным путем. Такие погодные условия

наблюдаются при сочетании следующих значений средней суточной температуры ( $t$ , °C) и относительной влажности воздуха ( $f$ , %):

- $t = 12,0 \dots 19,9$  °C и  $f \leq 85$  %;
- $t = 20,0 \dots 23,9$  °C и  $f \leq 75$  %;
- $t = 24,0 \dots 28,0$  °C и  $f = 25 \dots 50$  %.

При оценке комфортности климата среднемесячные температуры самого холодного и теплого месяцев малоинформативны. Тем не менее они отражают общие климатические особенности территории. Им был присвоен коэффициент значимости  $F = 2$ .

Интегральный показатель комфортности климата ( $K_{\text{инкк}}$ ) рассчитывается по следующему уравнению:

$$K_{\text{инкк}} = (C_1F_1 + C_2F_2 + C_3F_3 + \dots + C_nF_n) / (F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n),$$

где  $C$  – уровень комфортности  $i$ -го ЭКП, балл;  $F$  – коэффициент значимости  $i$ -го ЭКП.

Интегральный показатель комфортности климата дает представление о степени благоприятности окружающей среды городов для жизнедеятельности людей с учетом воздействия всего комплекса метеорологических факторов. В крупных городах Беларуси можно выделить четыре категории комфортности климатических условий в зависимости от  $K_{\text{инкк}}$ :

- $\geq 4,00$  – комфортные;
- от 3,00 до 3,99 – умеренно комфортные;
- от 2,00 до 2,99 – малокомфортные;
- $\leq 1,99$  – дискомфортные.

Разработанная методика геоэкологической оценки комфортности климата городов реализована в виде комплексной географической информационной системы геоэкологической оценки комфортности климата (ГИС ГОКК) на базе программ MS Access и ArcView GIS. Система включает в себя два основных блока. Первый из них представлен полифункциональной базой данных климатической информации в разрезе городов, во второй входят субблоки расчета частных и интегральных показателей оценки комфортности климата городов.

Для характеристики современного изменения комфортности климата в Минске были использованы средние суточные данные ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиационного загрязнения и мониторингу окружающей среды» о суммарной солнечной радиации и радиационном балансе, температуре и относительной влажности воздуха, парциальном давлении водяного пара, скорости ветра, атмосферном давлении, атмосферных осадках, общей облачности и туманах за 36-летний период (1980–2015), которые были обобщены и интерпретированы авторами настоящего исследования с учетом сезонной динамики и межгодовой изменчивости показателей.

## Результаты исследования

Анализ климатических условий в Минске за период с 1980 по 2015 г. выявил устойчивую тенденцию к увеличению в городе суммарной солнечной радиации  $Q$  (табл. 1). Среднегодовое значение  $Q$  за указанный временной интервал составило 3694,1 МДж/м<sup>2</sup> при коэффициенте вариации  $C_v$ , равном 5,25 %; максимальный годовой пик  $Q$  наблюдался в 2011 г. (4139,0 МДж/м<sup>2</sup>); минимальный показатель зафиксирован в 1980 г. (3291,0 МДж/м<sup>2</sup>). В экстремальные годы отклонение годового хода  $Q$  от многолетних значений отмечается в основном в теплый период (см. табл. 1). На май – июль приходится 45–50 % годового значения  $Q$ , с ноября по январь регистрируется всего около 5 %. Месячный показатель  $Q$  в июле примерно в 14 раз больше, чем в декабре. Средний годовой радиационный баланс  $R$  за рассматриваемый период составил 1503,8 МДж/м<sup>2</sup> при  $C_v$ , равном 7,67 %, максимальный отмечался в 2009 г. (1758,0 МДж/м<sup>2</sup>), минимальный – в 2001 г. (1255,0 МДж/м<sup>2</sup>).

Температура воздуха в городе отличается значительной временной изменчивостью и устойчивой тенденцией к повышению среднегодовых отметок. Наиболее низкая среднегодовая температура воздуха зафиксирована в 1987 г. (4,3 °C), максимальная – в 2015 г. (8,7 °C). Максимальная среднемесячная температура воздуха в основном наблюдалась в июле, минимальная приходилась на январь – февраль.

Среднегодовое атмосферное давление воздуха  $P$  в Минске характеризуется незначительной межгодовой изменчивостью и небольшой тенденцией к повышению. Более высокие значения атмосферного давления, как правило, отмечаются зимой, более низкие – летом. За период с 1980 по 2015 г. самое низкое среднемесячное атмосферное давление в январе наблюдалось в 2007 г. (977,6 гПа), самое высокое – в 2006 г. (1000,8 гПа). В июле данный показатель отличается меньшей изменчивостью: наиболее низкое атмосферное давление зафиксировано в 2000 г. (981,0 гПа), наиболее высокое – в 2006 г. (992,5 гПа).

Таблица 1

Средние годовые показатели климата в Минске за 1980–2015 гг.

Table 1

Average annual indices of the climate in Minsk during 1980–2015

Год	Климатические показатели							
	$Q$ , МДж/м <sup>2</sup>	$R$ , МДж/м <sup>2</sup>	$t$ , °С	$P$ , гПа	$v$ , м/с	$f$ , %	Ос, мм	Об, балл
1980	3291,0	1397,0	4,8	986,9	3,1	79,3	646,3	3,2
1981	3595,0	1622,0	6,4	986,4	2,9	77,0	737,8	7,5
1982	3547,0	1566,0	6,4	988,8	2,8	78,0	695,5	3,5
1983	3705,0	1532,0	7,4	985,8	3,0	76,1	592,4	3,6
1984	3421,0	1369,0	6,0	989,5	2,9	78,2	656,3	7,2
1985	3539,0	1533,0	4,6	986,9	2,7	79,1	706,9	7,2
1986	3608,0	1628,1	5,8	988,1	2,8	77,7	610,4	6,8
1987	3604,0	1490,0	4,3	988,2	2,8	78,7	726,0	6,6
1988	3583,0	1414,3	6,3	986,5	2,7	79,0	665,2	6,8
1989	3476,0	1588,3	7,9	987,1	2,6	79,9	746,4	7,1
1990	3520,0	1650,0	7,7	986,2	2,7	78,3	766,4	7,4
1991	3437,0	1532,1	6,9	989,0	2,5	79,1	541,3	7,3
1992	3684,0	1622,0	7,1	987,4	2,6	75,5	568,8	6,9
1993	3479,0	1647,0	5,8	988,4	2,6	77,3	725,3	7,2
1994	3645,0	1464,0	6,5	987,0	2,2	77,2	747,7	7,4
1995	3736,1	1472,0	6,9	986,8	2,2	76,7	558,2	7,1
1996	3738,8	1293,0	5,6	989,7	2,1	76,4	672,3	7,1
1997	3605,5	1546,5	6,2	986,6	2,3	77,5	693,7	7,4
1998	3447,8	1302,0	6,3	986,8	2,1	79,2	965,4	7,4
1999	4008,3	1447,0	7,8	987,5	2,1	73,7	575,2	7,1
2000	3580,7	1518,9	7,8	987,8	2,1	77,1	588,3	7,3
2001	3711,0	1255,0	7,0	987,4	2,2	77,1	714,1	7,2
2002	4086,6	1503,2	7,7	988,7	2,2	72,6	587,8	6,9
2003	3822,4	1356,5	6,4	989,4	2,2	77,5	615,0	7,2
2004	3698,4	1281,5	6,6	987,6	2,1	77,8	809,4	7,3
2005	3780,2	1466,3	6,8	989,3	2,0	77,3	765,8	7,0
2006	3937,0	1596,3	6,9	989,2	1,9	77,4	727,7	6,9
2007	3895,0	1609,0	7,8	987,2	1,9	76,8	585,9	7,4
2008	3769,0	1556,0	7,9	987,9	2,0	78,5	684,3	7,5
2009	3930,0	1758,0	7,0	988,1	1,6	79,4	899,2	3,5
2010	3818,0	1441,6	6,9	987,3	1,5	79,4	820,2	3,5
2011	4139,0	1513,0	7,6	989,7	1,4	75,7	631,1	3,6
2012	3806,0	1504,0	6,8	987,3	1,5	77,0	839,1	3,3
2013	3821,0	1520,0	7,5	987,2	1,4	77,0	677,0	3,4
2014	3885,0	1602,0	7,8	989,4	1,5	74,5	604,6	3,5
2015	3639,0	1539,0	8,7	989,0	1,6	73,2	563,2	5,9
Среднее значение за 1980–2015 гг.	3694,1	1503,8	6,8	987,8	2,2	77,3	686,4	6,2
Максимальное значение	4139,0	1758,0	8,7	989,7	3,1	79,9	965,4	7,5
Минимальное значение	3291,0	1255,0	4,3	985,8	1,4	72,6	541,3	3,2
$\sigma$	194,01	115,39	0,99	1,11	0,49	1,75	99,90	1,63
$C_v$	5,25	7,67	14,54	0,11	22,02	2,27	14,55	26,36

Примечание. Здесь и в табл. 2 и 3  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение.

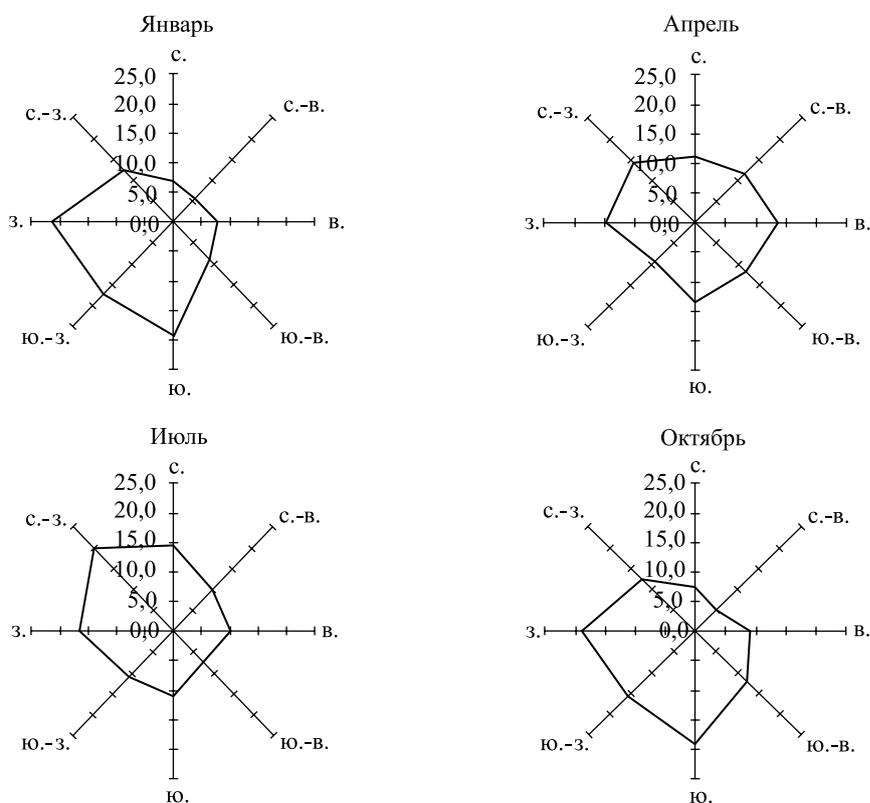
Относительная влажность воздуха  $f$  в Минске характеризуется малой временной изменчивостью и устойчивой тенденцией к уменьшению средних годовых значений. Она имеет достаточно выраженный годовой ход с минимумом в весенние месяцы (с апреля по май) и максимумом в осенне-зимний период (с ноября по январь). Средняя годовая относительная влажность воздуха в 1980–2015 гг. варьировала от 72,6 % в 2002 г. до 79,9 % в 1989 г. Анализ относительной влажности воздуха в разрезе сезонов года показал, что ее наибольшая межгодовая изменчивость отмечается в июле, наименьшая – в декабре.

Скорость ветра  $v$  имеет умеренную временную изменчивость, устойчивую тенденцию к снижению, относительно плавный годовой ход. Среднегодовая скорость ветра изменялась от 3,1 м/с в 1980 г. до 1,4 м/с в 2011 и 2013 гг. Максимальная скорость ветра в основном характерна для осенне-зимнего сезона, минимальная наблюдается весной и особенно летом. Сезонная динамика скорости ветра достаточно устойчива, но в отдельные годы существенно варьирует. Летом преобладающее направление ветра западное и северо-западное; осенью и зимой – западное, южное и юго-западное; весной – восточное и юго-восточное (см. рисунок). В исследуемый период в Минске преобладал западный ветер (17,1 %). Минимальная повторяемость характерна для северо-восточного ветра (8,1 %), значительная – для южного (до 16,3 %). Повторяемость штилей заметно увеличилась к концу рассматриваемого периода и в среднем составила 8,6 %.

Атмосферные осадки (ос) характеризуются существенной временной изменчивостью и тенденцией к увеличению их годового количества. В среднем минимум осадков выпадает в зимние месяцы, максимум – в летние, достигая пика в июле. В экстремальных ситуациях годовой ход атмосферных осадков имеет более сложный характер. Их количество варьировало от 541,3 мм в 1991 г. до 965,4 мм в 1998 г. Самыми дождливыми и засушливыми месяцами за исследуемый период были август 2006 г. (250,3 мм) и октябрь 2000 г. (1,5 мм) соответственно.

Облачность (об) в городе характеризуется незначительной временной изменчивостью. В годовом ходе облачности минимум приходится на теплый период года – с мая по август, максимальные значения отмечаются в ноябре – январе. В отдельные экстремальные годы он также имеет более сложный вид. Наблюдаются месяцы, когда не бывает ни одного ясного дня. Среднегодовая облачность за рассматриваемый период изменялась от 3,2 балла в 1980 г. до 7,5 балла в 2008 г.

Анализ ЭКП комфортности климатических условий в Минске показал, что в теплый период года наиболее значимой ее характеристикой является количество дней с НЭЭТ воздуха ( $K_{\text{НЭЭТ}}$ ), отражающими



Средняя повторяемость направления ветра в Минске за 1980–2015 гг.:

— повторяемость направления ветра

Average repeatability of the direction winds in Minsk during 1980–2015:

— frequency of wind direction

воздействие на человека совокупности метеорологических факторов: скорости ветра, температуры и относительной влажности воздуха. Наибольшее значение  $K_{нэот}$  наблюдалось в 2011 г. (56 дней), наименьшее – в 1980 г. (16 дней) (табл. 2). Душных дней ( $K_{дл}$ ) со среднесуточной температурой воздуха  $\geq 20$  °С и относительной влажностью воздуха  $\geq 75$  % в течение года немного – в среднем 3,7 дня. Максимальное значение  $K_{дл}$  наблюдалось в 2010 г. (15 дней). В 1992, 2005, 2012 и 2015 гг. подобные климатические условия отсутствовали вовсе. В холодный период года важной характеристикой комфортности климатических условий является количество дней с индексом холодового стресса по Хиллу (коэффициент дискомфорта периода  $K_{дп}$ )  $\geq 4,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·с). Максимальное число дней с дискомфортными значениями наблюдалось в 1980 г. (76 дней), минимальное – в 2015 г. (3 дня). Количество холодных дней ( $K_{хд}$ ) с температурой воздуха  $\leq -10$  °С в течение года значительно больше, чем количество душных дней. Максимальное значение  $K_{хд}$  зафиксировано в 1985 г. (46 дней), минимальное – в 1990 г., когда было всего 2 холодных дня.

Количество случаев с контрастными изменениями погоды ( $K_{ип}$ ) в среднем за рассматриваемый период составило 149 дней. При этом более выраженные погодные контрасты наблюдались в 1983 г. (170 дней), а наиболее стабильные погодные условия отмечались в 1984, 1991 и 2005 гг. (128 дней). Продолжительность комфортного периода эксплуатации жилых сооружений ( $K_{эжс}$ ) определяется с учетом влияния на них различных сочетаний среднесуточной температуры и относительной влажности воздуха. Количество дней с комфортными значениями  $K_{эжс}$  за 1980–2015 гг. в среднем составило 110. Наименее благоприятные условия наблюдались в 2010 г. (80 дней), наиболее комфортные – в 1983 г. (134 дня). Климатический потенциал самоочищения атмосферы ( $K_{кпс}$ ) в условиях города определяется как функция комплексного влияния числа дней со штилем, туманами, осадками (более 1 мм), сильным ветром (свыше 5 м/с). Наиболее неблагоприятные значения  $K_{кпс}$  зафиксированы в 1991 г. (0,7). Существенное влияние на изменение комфортности климата оказывает количество дней с резким межсуточным скачком атмосферного давления  $K_{ад} \geq 9$  гПа/сут, среднесуточными показателями относительной влажности воздуха  $K_{ов} \geq 80$  %; скорости ветра  $K_{св} \geq 5$  м/с; осадков  $K_{ос} \geq 1$  мм; облачности  $K_{об} \geq 6$  баллов.

На протяжении исследуемого периода самые неблагоприятные условия с резким межсуточным изменением атмосферного давления наблюдались в 1995 г. (64 дня), наиболее комфортные – в 2014 г. (21 день); максимальное количество дней с дискомфортными значениями ( $K_{ов}$ ) отмечалось в 1989 г. (204 дня), наименьшее – в 2002 г. (136 дней); максимальное количество дней с высокой среднесуточной скоростью ветра ( $K_{св}$ ) пришлось на 1980 г. (28 дней), а в 2006, 2008, 2009 и 2011 гг. были зафиксированы нулевые значения показателя  $K_{св}$ ; наибольшее число дней с осадками свыше 1 мм соответствовало 1998 г. (142 дня), а наименьшее – 2014 г. (94 дня); самые неблагоприятные условия с дискомфортными значениями  $K_{об}$  пришлось на 1981 г. (284 дня), а наиболее комфортные – на 2012 г. (71 день). Для характеристики комфортности климатических условий города были также использованы среднемесячные температуры самого холодного и теплого месяцев года, отражающие общие особенности климата. Наиболее высокая среднесуточная температура воздуха в Минске наблюдалась в июле 2010 г. (22,6 °С) и январе 1989 г. (0,5 °С), а минимальная – в июле 1984 г. (15,6 °С) и январе 1987 г. (–15,2 °С).

Анализ изменения интегрального показателя комфортности климата в Минске в 1980–2015 гг. выявил повышение уровня благоприятности климатических условий для жизнедеятельности его населения. На протяжении исследуемого периода в Минске отмечалась устойчивая тенденция к увеличению следующих параметров:

- количества дней с НЭЭТ воздуха от 17 до 21 °С и среднемесячной температурой в июле и январе;
- количества душных дней (незначительно);
- продолжительности комфортного периода эксплуатации жилых сооружений;
- интегрального показателя комфортности климата.

Тенденция к снижению характерна для таких параметров, как:

- продолжительность периода с индексом холодового стресса по Хиллу  $\geq 4,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·с);
- количество случаев с контрастными изменениями погоды;
- количество дней с межсуточным изменением атмосферного давления  $\geq 9$  гПа/сут, относительной влажностью воздуха  $\geq 80$  %, холодных дней с температурой воздуха  $\leq -10$  °С, дискомфортными значениями облачности  $\geq 6$  баллов, скоростью ветра  $\geq 5$  м/с, осадками  $\geq 1$  мм;
- климатический потенциал самоочищения атмосферы.

В Минске на протяжении 1980–2015 гг. преобладали умеренно комфортные (61 %) и малокомфортные (36 %) климатические условия. Комфортные климатические условия пришлось на 2013–2015 гг. Комфортность климата в Минске отличалась умеренной межгодовой изменчивостью. Коэффициент вариации  $K_{инкк}$  составил 15,98 %.

Средние годовые эколого-климатические показатели климата в Минске за 1980–2015 гг.

Table 2

Average annual eco-climatic indices in Minsk during 1980–2015

Год	Эколого-климатические показатели							
	$K_{\text{нэзг}}$ дн.	$K_{\text{дд}}$ дн.	$K_{\text{дп}}$ дн.	$K_{\text{хд}}$ дн.	$K_{\text{шп}}$ дн.	$K_{\text{ад}}$ дн.	$K_{\text{об}}$ дн.	$K_{\text{инкк}}$ отн. ед.
1980	16	7	76	26	161	43	197	1,94
1981	42	5	61	12	160	46	184	2,72
1982	25	3	40	8	138	39	176	2,68
1983	47	3	53	10	170	51	143	3,02
1984	18	1	73	7	128	33	192	2,44
1985	31	2	60	46	151	43	198	2,40
1986	32	2	53	33	167	50	179	2,50
1987	27	2	67	34	150	36	173	2,52
1988	42	6	54	16	167	53	185	2,76
1989	37	3	21	6	146	37	204	3,18
1990	22	2	25	2	158	41	191	2,66
1991	31	4	32	11	128	32	181	2,84
1992	33	0	33	4	156	57	165	3,28
1993	46	1	43	14	143	41	166	2,94
1994	27	1	13	18	155	52	166	2,94
1995	36	1	19	18	153	64	182	3,12
1996	37	2	30	32	138	25	174	3,22
1997	38	3	25	13	154	57	166	3,12
1998	41	6	22	15	156	53	199	2,80
1999	40	6	22	7	147	46	154	3,30
2000	53	1	8	5	143	29	174	3,78
2001	37	14	27	20	158	37	175	2,72
2002	44	4	16	19	131	36	136	3,66
2003	40	4	19	18	152	41	175	3,32
2004	33	4	15	12	160	47	182	3,12
2005	36	0	24	13	128	43	160	3,56
2006	50	3	15	25	137	23	194	3,62
2007	38	3	13	9	153	41	172	3,34
2008	51	2	10	3	157	39	192	3,44
2009	56	3	8	14	150	28	203	3,66
2010	37	15	15	34	158	29	196	3,08
2011	56	10	9	17	140	34	159	3,48
2012	46	0	9	33	162	36	167	3,70
2013	46	8	7	10	144	30	169	3,94
2014	46	2	8	18	133	21	147	3,98
2015	44	0	3	3	145	40	146	4,10
Среднее значение за 1980–2015 гг.	38,4	3,7	28,6	16,3	149,4	40,4	175,6	3,14
Максимальное значение	56	15	76	46	170	64	204	4,1
Минимальное значение	16	0	3	2	128	21	136	1,94
$\sigma$	9,84	3,53	20,72	10,6	11,5	10,12	17,5	0,5
$C_v$	25,64	95,49	72,55	65,23	7,72	25,07	9,97	15,98

Изучение тенденций изменения ЭКП за 1980–2015 гг. позволило разработать прогнозный сценарий возможного изменения комфортности климата в Минске до 2030 г., основанный на теоретических и методических положениях геоэкологического прогнозирования. Пятнадцатилетний лаг прогноза обусловлен небольшим периодом выборки исходной информации, при анализе которой выполнялась процедура проверки «выбросов», далее определялись уравнения регрессии изменения ЭКП, вычислялись среднеквадратичные отклонения и доверительные интервалы, рассчитывались их значения на перспективу. При определении уравнений регрессии изменения ЭКП были выполнены расчеты для линейной и экспоненциальной регрессионной моделей. Анализ полученных данных показал, что в соответствии с физическими особенностями для большинства рассматриваемых показателей следует использовать уравнение линейной регрессии, а для прогнозирования изменения  $v$ ,  $K_{дп}$ ,  $K_{хд}$  и  $K_{св}$  – уравнение экспоненциальной регрессии.

По прогнозному сценарию в 2030 г. в Минске возможно небольшое увеличение суммарной солнечной радиации, радиационного баланса, средней годовой температуры воздуха, атмосферного давления воздуха, атмосферных осадков и облачности; уменьшение относительной влажности и скорости ветра (табл. 3). Ожидается существенное увеличение продолжительности периода с комфортными НЭЭТ. По сравнению со средними значениями за 1980–2015 гг.  $K_{нээт}$  возрастет на 19 дней и достигнет 57 дней. Количество душных дней увеличится всего на 1–2 дня и составит 5–6 дней. Продолжительность дискомфортного периода с индексом холодового стресса по Хиллу  $\geq 4,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  значительно сократится – до 2–3 дней. Также ожидается уменьшение значений следующих параметров:

- числа дней с холодными погодными условиями (до 11–12);
- контрастными изменениями погоды (до 142);
- межсуточным изменением атмосферного давления  $\geq 9 \text{ гПа}/\text{сут}$  (до 27–28);
- относительной влажностью воздуха  $\geq 80 \%$  (до 161), средней скоростью ветра  $\geq 5 \text{ м}/\text{с}$  (до 1), осадками  $\geq 1 \text{ мм}$  (до 109–110) и облачностью  $\geq 6$  баллов (до 153–154).

Продолжительность комфортного периода эксплуатации жилых сооружений в 2030 г., по сравнению со средними значениями за 1980–2015 гг., возрастет на 15–16 дней. Климатический потенциал самоочищения атмосферы в 2030 г. снизится в первую очередь за счет сокращения количества дней с сильным ветром свыше 5 м/с, осадками более 1 мм и увеличения числа дней со штилем.

Таблица 3

**Изменение климатических и эколого-климатических показателей в Минске согласно прогнозному сценарию на 2030 г.**

Table 3

**Change the main climatic and eco-climatic indices in Minsk according to prognosis scenario on 2030**

ЭКП	Временная функция*	$\sigma$	Доверительный интервал при $p$ ( $\alpha = 0,05$ )	Среднее значение ЭКП за 1980–2015 гг.	ЭКП в 2030 г.
$Q$ , МДж/м <sup>2</sup>	$y = 12,715x + 3458,9$	194,01	$\pm 63,38$	3694,1	4107,4
$R$ , МДж/м <sup>2</sup>	$y = 0,083x + 1502,2$	115,39	$\pm 37,69$	1503,8	1506,4
$t$ , °С	$y = 0,054x + 5,771$	0,99	$\pm 0,32$	6,8	8,5
$P$ , гПа	$y = 0,036x + 987,17$	1,11	$\pm 0,36$	987,8	989,0
$v$ , м/с	$y = 3,228e^{-0,021x}$	0,49	$\pm 0,16$	2,2	1,1
$f$ , %	$y = -0,06x + 78,4$	1,75	$\pm 0,57$	77,3	75,3
Ос, мм	$y = 1,031x + 667,31$	99,90	$\pm 32,63$	686,4	719,9
Об, балл	$y = -0,038x + 6,9$	1,63	$\pm 0,53$	6,2	5,0
$K_{нээт}$ , дн.	$y = 0,589x + 27,473$	9,84	$\pm 3,21$	38,4	57,5
$K_{дп}$ , дн.	$y = 0,052x + 2,730$	3,53	$\pm 1,15$	3,7	5,4
$K_{дп}$ , дн.	$y = 74,663e^{-0,067x}$	20,72	$\pm 6,77$	28,6	2,5
$K_{хд}$ , дн.	$y = 13,558e^{-0,003x}$	10,60	$\pm 3,46$	16,3	11,6
$K_{шт}$ , дн.	$y = -0,238x + 153,76$	11,52	$\pm 3,76$	149,4	141,6

ЭКП	Временная функция*	$\sigma$	Доверительный интервал при $p$ ( $\alpha = 0,05$ )	Среднее значение ЭКП за 1980–2015 гг.	ЭКП в 2030 г.
$K_{ад}$ , дн.	$y = -0,398x + 47,725$	10,12	$\pm 3,31$	40,4	27,4
$K_{об}$ , дн.	$y = -0,457x + 184,06$	17,50	$\pm 5,72$	175,6	160,8
$K_{св}$ , дн.	$y = 27,109e^{-0,125x}$	7,18	$\pm 2,35$	6,3	0,1
$K_{ос}$ , дн.	$y = -0,248x + 122,08$	12,23	$\pm 4,0$	117,5	109,5
$K_{об}$ , дн.	$y = -1,855x + 248,46$	77,14	$\pm 25,2$	214,1	153,9
$K_{эжс}$ , дн.	$y = 0,487x + 101,88$	13,0	$\pm 4,25$	110,9	126,7
$K_{кис}$ , отн. ед.	$y = -0,003x + 0,46$	0,11	$\pm 0,04$	0,4	0,3
$t_{и}$ , °С	$y = 0,093x + 16,935$	1,87	$\pm 0,61$	18,7	21,7
$t_{я}$ , °С	$y = 0,024x - 5,004$	3,57	$\pm 1,17$	-4,6	-3,8
$K_{инкс}$ , отн. ед.	$y = 0,04x + 2,394$	0,50	$\pm 0,16$	3,14	4,44

\*Рассчитана по уравнению регрессии.

Ожидается повышение среднемесячной температуры воздуха в июле и январе. По сравнению со средними значениями за 1980–2015 гг. температура воздуха в июле ( $t_{и}$ ) 2030 г. может увеличиться на 3,0 °С, в январе ( $t_{я}$ ) – на 0,8 °С. Интегральный показатель комфортности климата возрастет на 1,3, благодаря чему климатические условия в городе будут более благоприятными.

### Заключение

Климатофизиология человека в погодных условиях Минска в значительной мере проявляется в реакциях приспособления к меняющимся условиям внешней среды. Частые циклоны и антициклоны вызывают адаптационные реакции на изменяющиеся атмосферное давление, температуру, влажность и скорость движения воздуха, солнечные и пасмурные дни, затяжные, обложные дожди и кратковременные ливни с грозами и резкими изменениями атмосферного электричества. Метеопатические проявления обычно возникают одновременно у значительного числа разных людей, синхронно погодным изменениям или несколько опережая их. Они не только обостряют или ухудшают течение болезней, но и снижают эффективность любого метода лечения. Таким образом, в городских условиях оценка влияния изменчивости метеорологических условий на организм человека является одним из организационных методов совершенствования медицинского обслуживания населения. Учет и своевременная профилактика метеотропных реакций позволяют в значительной степени ослабить отрицательное воздействие неблагоприятных климатических условий на человека. Проведенные исследования могут быть использованы в практике рационального применения естественных ресурсов Минска при планировании и проектировании природопользования для его устойчивого развития и оптимизации среды жизнедеятельности населения.

### Библиографические ссылки

1. Витченко А. Н., Телеш И. А. Методика геоэкологической оценки комфортности климата городов // Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. 2007. № 2. С. 99–104.
2. Русанов В. И. Комплексные метеорологические показатели и методы оценки климата для медицинских целей. Томск, 1989.
3. Бартон А., Эдхолм О. Человек в условиях холода. М., 1957.
4. Золотокрылин А. Н., Канцеровская И. В., Кренке А. Н. Районирование территории России по степени экстремальности природных условий для жизни // Изв. РАН. Сер. геогр. 1992. № 6. С. 16–30.
5. Айзенштадт Б. А. Тепловой баланс человека и его здоровье // Климат и здоровье человека : тр. Междунар. симпоз. ВМО, ВОЗ, ЮНЕП (Ленинград, 22–26 сент. 1986 г.) : в 2 т. Ленинград, 1988. Т. 1. С. 197–209.
6. Бутыева И. В., Швейнова Т. Г. Методические вопросы интегрального анализа медико-климатических условий // Комплекс. биоклимат. исследования. 1988. С. 97–106.
7. Селегей Т. С., Юрченко И. П. Потенциал рассеивающей способности атмосферы // География и природ. ресурсы. 1990. № 2. С. 132–137.
8. Гербурт-Гейбович А. А. Оценка климата для типового проектирования жилищ. Ленинград, 1971.

## References

1. Vitchenko A. N., Telesh I. A. Research technique of the geoecological estimate of the climatic comfort of the cities. *Vestnik BGU. Ser. 2, Khim. Biol. Geogr.* 2007. No. 2. P. 99–104 (in Russ.).
2. Rusanov V. I. [The complex meteorological indices and methods of the estimation of the climate for medical purposes]. Tomsk, 1989 (in Russ.).
3. Barton A., Edholm O. [Person in condition of the cold]. Moscow, 1957 (in Russ.).
4. Zolotokrylin A. N., Kancebovskaya I. V., Krenke A. N. [Division in to districts territory of Russia on degree extremality natural conditions for life]. *Izv. RAN. Ser. geogr.* 1992. No. 6. P. 16–30 (in Russ.).
5. Aizenshtadt B. A. [Heat balance of the person and his health]. *Climat i zdorov. cheloveka* : tr. Mezhdunar. simpoziuma VMO, VOZ, YuNEP. Leningrad, 1988. Vol. 1. P. 197–209 (in Russ.).
6. But'eva I. V., Shveinova T. G. [The methodical questions of the integral analysis medicine-climatic conditions]. *Kompleksnyye bioklimaticheskie issledovaniya*. 1988. P. 97–106 (in Russ.).
7. Selegey T. S., Yurchenko I. P. [The potential diffusing abilities of atmosphere]. [*Geogr. Nat. Res.*]. 1990. No. 2. P. 132–137 (in Russ.).
8. Gerburt-Geibovich A. A. [The estimation of the climate for standard designing of dwelling buildings]. Leningrad, 1971 (in Russ.).

*Статья поступила в редколлегию 07.03.2017.  
Received by editorial board 07.03.2017.*