

С.В. Ткачук

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕЗОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ

S.V. Tkachuk

COMPARATIVE ANALYSIS OF BIOCLIMATIC INDEXES FOR PREDICTION USING A MESOSCALE MODEL

В работе представлена обобщенная информация об историческом развитии наиболее часто используемых в отечественной и зарубежной практике биоклиматических индексах. Особое внимание уделено изучению влияния на самочувствие человека таких метеорологических параметров, как температура и влажность воздуха, а также скорость ветра. Во второй части работы показаны первоначальные результаты моделирования некоторых биоклиматических индексов для Москвы с помощью городской версии мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecast).

Ключевые слова: биоклиматические индексы, эффективная температура, климатическая зона комфорта, прогноз биоклиматических индексов.

This paper considers summary information of the historical development of the most commonly bioclimatic indexes used in domestic and foreign practice. Particular attention is devoted to influence the meteorological parameters such as temperature and humidity, and wind speed on human health. The second part shows the initial results of modeling some bioclimatic indices for the city of Moscow with application the urban version of the mesoscale model WRF (Weather Research and Forecast).

Key words: bioclimatic indexes, effective temperature, climate comfort zone, bioclimatic indexes forecast.

Биоклиматические индексы в физическом отношении характеризуют особенности тепловой структуры среды и являются косвенным индикатором состояния теплового поля, окружающего человека [8]. Степень дискомфорта, возникающего от избытка тепла, обычно оценивается с помощью одного или нескольких биометеорологических температурных индексов. Наиболее часто употребляется эффективная температура (далее ЭТ). Она представляет собой температуру неподвижного воздуха, насыщенного водяным паром, в котором человек испытывает субъективно такое же ощущение комфорта, как и в среде, для которой находится эффективная температура. В публикациях приводится информация, по крайней мере, о семи расчетных формулах для определения ЭТ.

Одной из наиболее широко используемых формул определения эффективной температуры является формула Миссенарда:

$$ЭТ = t - 0,4(t - 10)(1 - f / 100), \quad (1)$$

где t – температура сухого термометра, °С; f – относительная влажность, %.

Некоторые показатели, полученные эмпирически, подтверждают величину ЭТ. Это индексы дискомфорта: температурно-влажностный индекс Тома DI [14], индекс Кавамутры DIk [9] и индекс Тенненбаума DIt [9]:

$$DI = 0,4(t - t_{cm}) + 4,8; \quad (2)$$

$$DIk = 0,99t + 0,36t_d + 41,5; \quad (3)$$

$$DIt = \frac{t + t_{cm}}{2}, \quad (4)$$

где t – температура сухого термометра, °С; t_{cm} – температура смоченного термометра, °С; t_d – температура точки росы, °С.

Все индексы при отсутствии ветра и при одинаковых тепловых нагрузках имеют небольшие отклонения от порогового значения, равного 24 °С. Нормальные теплоощущения человека приходятся на оценки индексов DI: $DI < 70$, $60 < DIk < 70$.

Эффективные температуры получили широкое распространение в практике оценок тепловых нагрузок, дискомфорта среды и особенно при климатолечении. Ценность ЭТ, как биоклиматического показателя, состоит в том, что его можно использовать как для теплого, так и для холодного сезонов года. ЭТ оцениваются следующим образом:

Таблица 1

Теплоощущения человека в зависимости от значений ЭТ

ЭТ	>30	30...24	24...18	18...12	12...6	6...0
Ощущение	Очень жарко	Жарко	Тепло	Умеренно тепло	Прохладно	Умеренно
Нагрузка	Сильная	Умеренная	Комфортно	Комфортно		

ЭТ	0...-12	-12...-24	-24...-30	<-30
Ощущение	Холодно	Очень холодно	Крайне холодно	Крайне холодно
Нагрузка	Умеренная	Сильная угроза обмороживания	Очень сильная	Чрезвычайно высокая вероятность замерзания

По эффективным температурам, в частности, оцениваются категории опасности при тепловом синдроме (табл. 2).

Таблица 2

Категории опасности при тепловом синдроме в зависимости от эффективной температуры [4]

ЭТ	Тепловой синдром и его последствия	Категория опасности
>54	Непосредственная угроза теплового или солнечного удара	Чрезвычайная опасность
40...54	Высокая вероятность солнечного удара и теплового истощения	Опасность
32...40	Возможность солнечного удара, тепловых спазмов или теплового истощения	Чрезвычайная осторожность
27...32	Возможность повышенной утомляемости	Осторожность

В дальнейшем диапазон изменений тепловых свойств среды был расширен включением в число переменных скорости ветра.

В отечественной практике расчетов общего влияния температуры, влажности и скорости ветра применяется так называемая эквивалентно-эффективная температура (далее – ЭЭТ), которая характеризует теплоощущение человека в тени и рассчитывается по формуле, предложенной Б.А. Айзенштадтом [1]:

$$\begin{aligned} \text{ЭЭТ} = & t[1 - 0,003F] - 0,385V^{0,59}[(36,6 - t) + 0,622(V - 1)] + \\ & + [(0,0015V + 0,008)(36,6 - t) - 0,0167]F, \end{aligned} \quad (5)$$

где t – температура воздуха, °С; V – скорость ветра, м/с; $F = 100 - f$, f – относительная влажность, %.

ЭЭТ используется также гигиенистами и физиологами при расчетах оптимальных сочетаний метеорологических параметров в рабочей зоне производственных помещений. Так, по данным М.Е. Маршакова и В.Г. Давыдова [12], верхней границей теплового равновесия человека, находящегося в состоянии покоя, является температура воздуха 30...31 °С при относительной влажности 85 % или 40 °С при относительной влажности 30 %. Эти границы меняются при выполнении физической работы.

ЭЭТ используется также при климатолечении аэротерапией, так как при определении показаний и дозировки аэротерапии необходим учет не только температуры, но и других параметров (влажность, скорость ветра), отражающих охлаждающую способность воздуха. А интегральным показателем, отражающим указанные метеорологические условия внешней среды, как раз и является эквивалентно-эффективная температура.

Недостаток индексов ЭТ и ЭЭТ состоит в недоучете теплоощущения человека от нагревания солнечной радиацией. Он преодолевается применением радиационно-эквивалентно-эффективной температуры (РЭЭТ).

Согласно [7], РЭЭТ определяется по эмпирической формуле:

$$\text{РЭЭТ} = 125 \lg \left[\begin{aligned} & 1 + 0,02t + 0,001(t - 8)(f - 60) - \\ & - 0,45(33 - t)\sqrt{V} + 0,129\beta \end{aligned} \right] \quad (6)$$

где t – температура воздуха, °С; V – скорость ветра, м/с; f – относительная влажность, %; β – поглощенная поверхностью тела солнечная радиация, кВт/м²; $\beta = \varepsilon(1 - \alpha)$, α – альbedo кожи, $\alpha = 0,28$ – для непигментированной кожи; $\alpha = 0,11$ – для пигментированной кожи; ε – суммарная солнечная радиация, кВт/м².

Пределы эффективных температур, соответствующих условиям комфорта теплоощущения, иллюстрируются в табл. 3.

Таблица 3

Пределы комфорта по ЭТ, ЭЭТ, РЭЭТ в условиях умеренных широт [8]

Для человека	ЭТ	ЭЭТ	РЭЭТ
Раздетого	22,5...24,5	17,3...21,7	20,3...24,7
Одетого	–	16,7...20,6	19,7...23,6

Метеорологическая служба Австралии для характеристики совместного влияния температуры и влажности воздуха рассматривает нерадиационную версию эффективной температуры (далее АТ – apparent temperature), предложенную Стедменом [18]:

$$AT = t + 0,33e - 0,70V - 4, \quad (7)$$

где АТ – эффективная температура по Стедмену, °С; t – температура воздуха, °С; V – средняя скорость ветра на стандартной высоте 10 м, м/с; e – давление водяного пара, гПа. Риски термической опасности в зависимости от значений АТ показаны в табл. 4.

Таблица 4

Риски термической опасности в зависимости от значений АТ

Значение индекса АТ	Категория опасности
<	Минимальная
18...22	Средняя
23...28	Высокая
>28	Экстремальная

В США для учета тепловой нагрузки используется более ранний аналог индекса АТ, так называемый индекс жары (HI, Heat Index), предложенный Стедменом [17]. Он рассчитывается по формуле:

$$HI = -42,379 + 2,04901523t + 10,14333127f - 0,2247554t \cdot f - 0,00683783t^2 - 0,05481717f^2 + 0,00122874t^2 + 0,00085282T \cdot f^2 - 0,00000199t^2 \cdot f, \quad (8)$$

где HI – индекс жары; t – температура воздуха, °С; f – относительная влажность воздуха, %. Категории опасности в зависимости от значений индекса HI представлены в табл. 5.

Таблица 5

Категории опасности в зависимости от значений индекса HI

Значение индекса HI	Категория опасности	Возможные нарушения в группах высокого риска
27-32	Внимание	При физических нагрузках возможно утомление
32-41	Предельная осторожность	Мышечные судороги, тепловой и солнечный удар, спазм сосудов от перегрева
41-54	Опасность	При длительном воздействии и/или при физической нагрузке возможны солнечный или тепловой удар, мышечные судороги.
>54	Повышенная опасность	Тепловой или солнечный удар

Методы анализа различного вида эффективных температур обычно используются для теплого времени года. В холодный период показателем климатических условий обычно служат индексы дискомфорта или холодового стресса [8, 9].

Индекс ветрового охлаждения был введен Сайплом и Пасселом [15] для скоростей ветра более 12 м/с. Первоначально он рассчитывался как время, за которое сосуд с охлажденной водой замерзнет под воздействием различных значений скорости и ветра и температуры, а не как модель потерь тепла человеческим телом при эквивалентных условиях. В дальнейшем Стедмен ([16] и последующие уточнения [17, 18]) предложил улучшенную формулу индекса ветрового охлаждения, основанную на биофизической модели баланса энергии человеческого тела. Общемировая стандартная методика, учитывающая влияние скорости ветра на комфорт, применяется и в России:

$$WCI = (10\sqrt{V} - V + 10,5)(33 - t), \quad (9)$$

где WCI – индекс охлаждения ветром, Вт/м²·ч; V – скорость ветра, м/с; t – температура воздуха, °С. По индексу WCI теплоощущение оценивается по следующим категориям [Вт/(м²·ч)]: менее 0,7 – прохладно, 1,2 – очень холодно, >3,0 – невыносимый холод.

Известен также индекс ветрового (сухого) охлаждения Хилла [8], определяющийся по формуле:

$$H_c = (0,13 + V^{0,5})(36,6 - t), \quad (10)$$

где t – температура среды, °С; V – скорость ветра, м/с.

Теплоощущение условий среды по индексу H_c разделяются: $H_c < 0,35$ – жарко, $0,6 < H_c < 0,9$ – комфортно, $H_c > 1,7$ – холодно, $H_c > 2,3$ экстремально холодно.

С учетом упругости водяного пара:

$$H_w = H_c + (0,085 + 0,0102V^{0,3})(61,1 - e)^{0,75}, \quad (11)$$

где e – упругость водяного пара, гПа.

Индекс H_w характеризует интенсивность потерь во влажном движущемся потоке воздуха. При отрицательных и весьма высоких положительных температурах воздуха (более 24 °С) ветровой поток усиливает состояние дискомфорта. При $H_w = 4,5$ –5,5 Вт/(м²·с) погодные условия зимы считаются дискомфортными, при $H_w > 8$ Вт/(м²·с) – абсолютно дискомфортными.

По данным Всемирной организации здравоохранения (WHO, <http://www.who.int/en/>) более 90 % людей с различными заболеваниями являются метеочувствительными, т.е. реагируют на изменения погоды. Большое количество организаций по всему миру (Национальный институт здоровья США

(НИН), Национальная служба погоды США, Метеобюро Москвы и Московской области, Метеорологический сервис Новой Зеландии и др.) предоставляют информацию о патогенности метеоусловий в режиме на своих сайтах в Интернете. Обычно для характеристики погодной нагрузки используется эффективная температура или ее производные. Чтобы оценить пространственное изменение некоторых индексов, были построены поля эффективной температуры, эквивалентно-эффективной температуры, индекса жары (НИ) и эффективной температуры по Стедмену (АТ) для административных округов Москвы для фиксированной даты – 26 июля 2010 г. В этот день (по данным опорной метеостанции на ВВЦ) дневной максимум температуры воздуха превышал среднюю многолетнюю норму для июля на 19,0 °С. Результаты приведены на рис. 1–4.

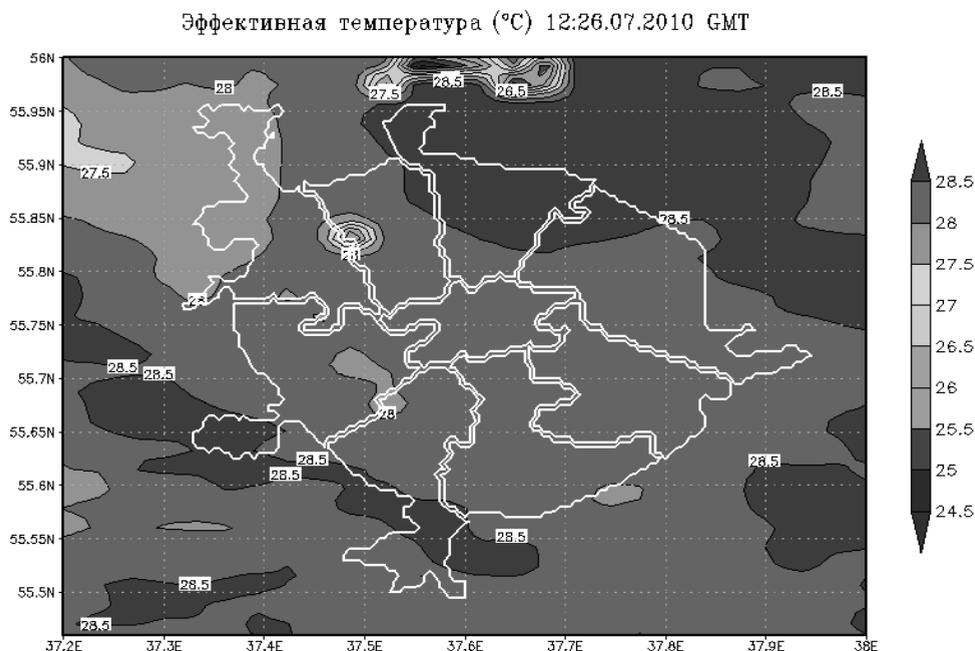


Рис. 1. Прогноз ЭТ по формуле (1) для округов Москвы с использованием городской версии модели WRF

Стоит отметить, что все рассмотренные индексы в этот день в Москве показывали высокие значения. По градациям для эффективной температуры (рис. 1), как было рассмотрено выше, значения, превышающие 28 °С, характеризуют теплоощущение как жаркое, при этом тепловая нагрузка считается умеренной (табл. 1). Связано это, по-видимому, с недоучетом влияния ветра, что компенсируется в ЭЭТ (рис. 2), которая принимает значения в пределах 25,5–26,5 °С.

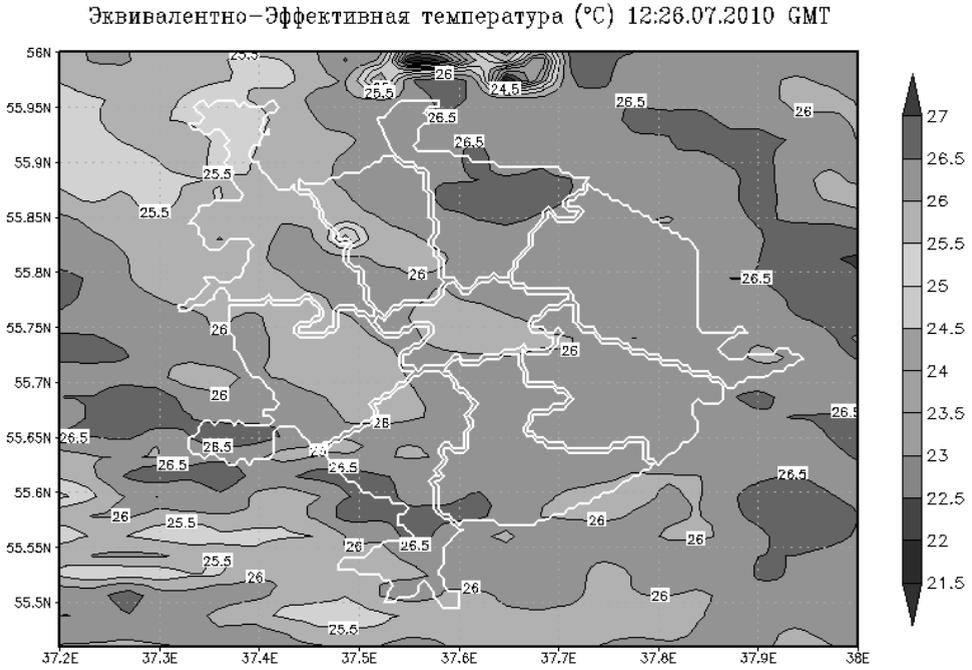


Рис. 2. Прогноз ЭЭТ по формуле (5) для округов Москвы с использованием городской версии модели WRF

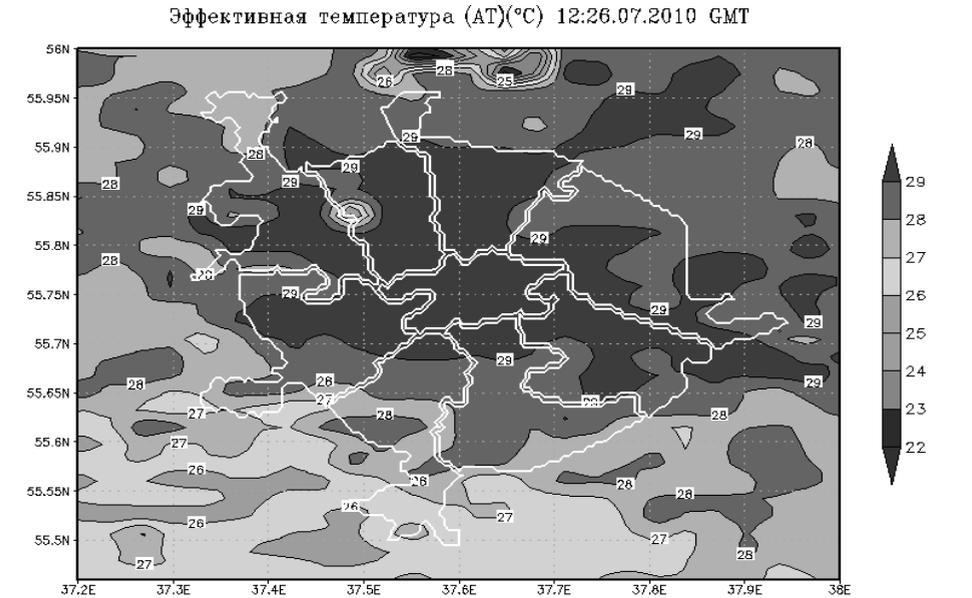


Рис. 3. Прогноз индекса АТ по формуле (5) для округов Москвы с использованием городской версии модели WRF.

Heat index 12:26.07.2010 GMT

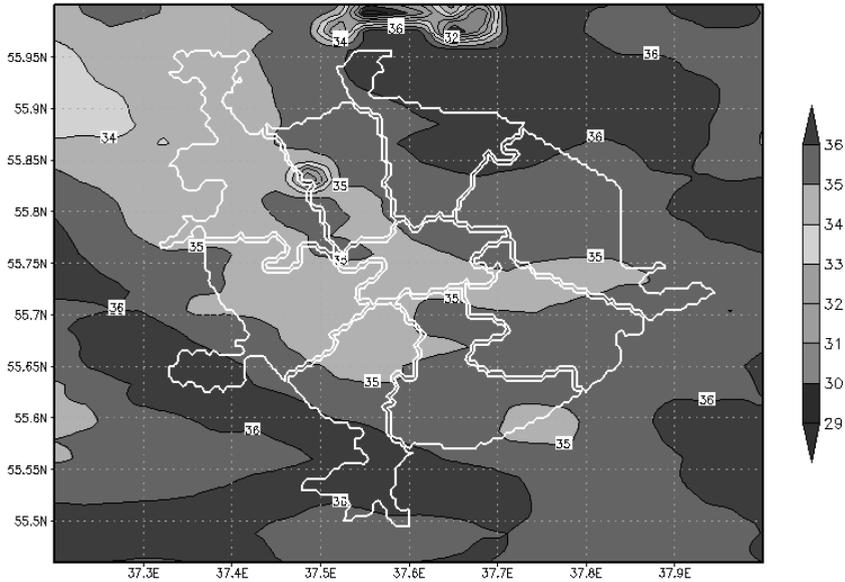


Рис. 4. Прогноз индекса жары HI по формуле (8) для округов Москвы с использованием городской версии модели WRF

Такие показания (табл. 3), как и значения ЭТ, значительно превышают пределы зоны комфорта для умеренных широт. Но при этом теплоощущение при таких показаниях ЭЭТ считается слабым надкомфортом [11]. На рис. 3 представлена ЭТ, предложенная Стедменом [формула (5)] Для Москвы такие значения попадают в категорию «экстремальной опасности». Также стоит отметить, что этот индекс имеет наибольшую изменчивость на территории Москвы. Индекс жары HI принимает значения, попадающие в категорию опасности «предельная осторожность» (табл. 5). Кроме этого, интересной является такая особенность пространственного распределения этого индекса: за пределами столичного региона значения HI оказываются немного выше. Примечательным также является тот факт, что на северо-западе города образуется так называемый «остров комфорта», где значения всех представленных индексов (кроме HI) находятся в рамках комфортной тепловой нагрузки. Этот эффект, по видимому, связан с тем, что в этом районе находятся водные объекты, которые сглаживают влияние тепловой нагрузки.

Помимо индексов, характеризующих тепловую и ветровую нагрузки на человека, существуют интегральные индексы, учитывающие различные характеристики погоды. Так, например, Богаткиным [5] был предложен метеорологический индекс МИЗ, который рассматривает влияние на человека не только скорости ветра, температуры и влажности воздуха, но и наличия осадков и облачности, а также давление и его тенденции. Г.Д. Латышев и В.Г. Бокша [6, 10]

предложили клинический индекс погоды, который складывается из частных индексов патогенности, отражающих динамику погоды суток по изменению температуры воздуха, влажности, скорости ветра, облачности, междусуточного изменения атмосферного давления. С.С. Андреевым [1, 2] был разработан интегральный показатель биоклиматической комфортности, учитывающий различные биоклиматические индексы, степень патогенности метеоусловий, а также потенциал самоочищения атмосферы. Пятигорским ГНИИ Курортологии ФМБА России совместно с Северо-Кавказским метеоагентством, Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Гидрометцентром России были разработаны классификаторы индексов биотропности, на основе которых рассчитывается интегральный индекс патогенности погоды (ИПП) по формуле [11, 13]:

$$\text{ИПП} = [k_1(\text{ЭЭТ}) + k_2(\Delta T_{\text{мс}}) + k_3(\Delta T_{\text{кн}}) + k_4(\Delta T_{\text{вс}}) + k_5(\Delta P_{\text{мс}}) + k_6(\Delta P_{\text{кн}}) + k_7(V) + k_8(N) + k_9(\text{UVI}) + k_{10}(e + \text{ЭЭТ}) + k_{11}(f) + k_{12}(\text{O}_2) + k_{13}(\text{осад}) + k_{14}(\text{ИЗА}) + k_{15}(\text{Ар})] / n, \quad (12)$$

где $k_i(a_i)$ – индексы биотропности, зависящие от величин соответствующих параметров состояния атмосферы (СМГГМ и ФАЗА) a_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), а именно: ЭЭТ – эквивалентно-эффективная температура для нормально одетого человека, ЭЭТ = $37 - (37 - t)/0,68 - 0,0014f + (1/1,76 + 1,4 V^{0,75}) - 0,29t (1 - f/100)$; в формуле: t – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; f – относительная влажность воздуха, %; V – скорость ветра, м/с; $\Delta T_{\text{мс}}$ – междусуточная изменчивость температуры воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{\text{кн}}$ – отклонение температуры воздуха от средней климатической нормы для данного дня или промежутка времени, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{\text{вс}}$ – суточная амплитуда температуры воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta P_{\text{мс}}$ – междусуточная изменчивость давления воздуха, мм рт. ст.; $\Delta P_{\text{кн}}$ – отклонение давления воздуха от средней климатической нормы, мм рт. ст.; V – скорость ветра, м/с; N – площадь покрытия небосвода нижней облачностью, баллы; UVI – ультрафиолетовый индекс солнечной радиации (индекс эритемно-активной радиации); $(e + \text{ЭЭТ})$ – комплекс упругости водяного пара и ЭЭТ, отражающий интенсивность физиологической нагрузки на метеочувствительных больных (явления атмосферной «духоты», перегрева, переохлаждения и др.); f – относительная влажность воздуха, %; O_2 – весовое содержание кислорода в приземной атмосфере, г/м³; осад. – количество осадков за рассматриваемый промежуток времени, мм/сутки; ИЗА – индекс загрязнения атмосферы; Ар – индекс гелиогеомагнитной активности.

Величина $n = 15$ соответствует числу рассмотренных влияющих процессов. Величина ИПП изменяется от 0 до 0,94, что позволяет ввести различные градации ИПП, удовлетворительно согласующиеся с принятыми в медицине критериями физиологического воздействия: индифферентное (ИПП 0-0,25), слабое (ИПП 0,26-0,45), умеренное (ИПП 0,46-0,65), резкое (ИПП 0,66-0,80), чрезмерно резкое (ИПП выше 0,81).

Заключение

В представленной работе произведен анализ наиболее информативных биоклиматологических индексов по данным [3]. Выявлено, что для территории

различных административных округов Москвы наибольшую изменчивость, а значит, и информативную значимость, имеет индекс АТ, который используется Метеорологическим центром Новой Зеландии. При этом стоит отметить, что в очень жаркий день летом 2010 г. эти индексы показали среднюю тепловую нагрузку. В дальнейших планах автора продолжить исследование прогноза климатических индексов для Москвы в различные сезоны года.

Литература

1. *Айзенштат Б.А.* Рекомендации по описанию климата большого города. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978, ч. 4.
2. *Андреев С.С.* Концепция геоэкологического исследования закономерностей пространственно-временного распределения климатической комфортности на территории Южного Федерального округа // *Естественные и технические науки*, 2008, № 2, с. 274-285.
3. *Андреев С.С., Андреева Е.С.* О разработке методики оценки климатической комфортности территорий // *Материалы междунар. конф. «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон».*
4. *Беттен Г.* Погода в нашей жизни. – М.: Мир, 1985.
5. *Богаткин О.Г.* Метеорологический индекс здоровья и экономические возможности его применения // *Погода и биосистемы. Материалы междунар. конф.* – СПб.: 2006, с. 173-178.
6. *Бокиа В.Г., Богуцкий Б.В.* Медицинская метеорология и климатотерапия. – Киев: Здоровье, 1980.
7. *Головина Е.Г., Русанов В.И.* Некоторые вопросы биометеорологии: Уч. пос. – СПб.: РГТМУ, 1993.
8. *Исаев А.А.* Экологическая климатология. – М.: Научный мир, 2001.
9. *Кобышева Н.В., Стадник В.В., Клюева М.В. и др.* Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики. – СПб., 2008.
10. *Латышев Г.Д., Бокиа В.Г.* К вопросу медицинской оценки погод (индекс погоды и реакции больных) // *Вопросы курортологии*, 1965, № 4, с. 345-351.
11. Новые медицинские технологии по климатотерапии и климатопрфилактик на горных курортах / *Поволоцкая Н.П., Ефименко Н.В., Жерлицина Л.И. и др.* // *Всероссийский форум "Развитие санаторно-курортной помощи, восстановительного лечения и медицинской реабилитации"*. – М.: МЗиСРРФ, 2010, с. 58-60.
12. *Рофе А.И.* Научная организация труда. – М.: Изд-во «МИК», 1998.
13. Система медицинского прогноза погоды на федеральных курортах Кавказских Минеральных Вод: Метод. пос. / *И.Г. Гранберг, Н.П. Поволоцкая, Г.С. Голицын и др.* – ФГУ «ПГНИИК ФМБА России»: УРАН ИФА им. А.М. Обухова РАН: Гидрометцентр России. – Пятигорск, 2009.
14. *Ott W.R., Thom G.* A critical review of air pollution index system in the United States and Canada // *J. Air. Pollut. Contr. Assoc.*, 1976, Vol. 26, № 5, p. 460-470.
15. *Siple P.A., Passel C.F.* Measurements of dry atmospheric cooling in sub-freezing temperatures. Reports on scientific results of the United States Antarctic Service Expedition, 1939–1941 // *Proc. Amer. Philos.*, 1945, Soc. 89, p. 177–199.
16. *Steadman R.G.* Indices of wind chill of clothed persons // *J. Appl. Meteor.*, 1971, 10, 674–683.
17. *Steadman R.G.* The Assessment of Sultriness. Part II: Effects of Wind, Extra Radiation and Barometric Pressure on Apparent Temperature // *J. Appl. Meteor.*, 1979, Vol. 18, No 7, p. 874-885.
18. *Steadman R. G.* Norms of apparent temperature in Australia // *Aust. Meteor.*, 1994, Mag. 43.

Работа выполнена с частичной поддержкой гранта РФФИ 1 1–1 0-08-00493-а и FP7 - IRSES - "Climseas".

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки в рамках реализации ФЦП ««Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0742).

Автор выражает благодарность за неоценимую помощь при подготовке материалов статьи К.Г. Рубинштейну, Н.П. Поволоцкой и М.В. Ширяеву.