

УДК 551.586

ДИНАМИКА БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОМФОРТНОСТИ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ В УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Ю.П. Переведенцев, А.В. Шумихина

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

Приведен обзор биометеорологических индексов, используемых при оценке комфортности условий погоды и климата. Выполнены статистические расчеты эффективной и эквивалентно-эффективной температуры для 8 метеостанций Удмуртской Республики в период 1961–2014 гг. Индексы жесткости погоды и патогенности позволили охарактеризовать степень влияния изменчивых погодных условий на функциональное состояние организма. Комфортные условия погоды отмечаются лишь в летний период, в зимний период их характер раздражающий или острый. Преобладают положительные значения коэффициентов наклона линейного тренда большинства биометеорологических индексов, что свидетельствует об улучшении климатических условий последних десятилетий. Приведены примеры расчетов биометеорологических индексов для экстремальных погодных ситуаций.

Ключевые слова: биоклимат, биометеорологические индексы, комфортные условия, индекс патогенности, Удмуртская Республика

Введение

В последние годы в России и за рубежом много внимания уделяется изучению современных изменений климата и погодных условий способных оказать влияние на жизнедеятельность и здоровье человека наряду с такими традиционными факторами риска индустриальной эпохи, как загрязнение атмосферного воздуха и питьевой воды, курение, наркомания и др. [1]. Особое внимание уделяется экстремальным климатическим событиям, проявляющимся в виде тепловых волн, сильных ветров, интенсивных осадков и т. п. В работах [2, 3] показано, что устойчивая продолжительная жаркая погода вызывает увеличение числа дополнительных смертей и заболеваний системы кровообращения, органов дыхания и эндокринной системы. Рассматриваются последствия летней жары в Западной Европе (2003 г.), волн жары в Москве в 2001 и 2003 гг. и особенно катастрофические последствия жары лета 2010 г. на территории Европейской части России, возникшей из-за блокирующего антициклона [4]. Негативно влияют на здоровье человека и волны холода. Все это происходит на фоне современных глобальных и региональных изменений климата, отраженных в работах [5–10].

В настоящей статье с использованием ряда биометеорологических индексов сделана попытка охарактеризовать биоклиматические условия, складывающихся

на территории Удмуртской Республики в последние десятилетия. Это сделано в интересах решения проблемы адаптации человека к изменениям климата в период глобального потепления, активная фаза которого началась с середины 70-х годов XX в. Кроме того, биоклиматическая оценка территории может быть полезной для здравоохранения и рекреации населения.

Исходные материалы и методика исследования

В качестве исходных данных использовались материалы метеорологических ежемесячников с 1961 по 2014 г., а также данные срочных наблюдений на метеостанциях Ижевск и Глазов в период с 2005 по 2015 г. По формулам рассчитаны биометеорологические показатели, их средние, максимальные и минимальные значения, средние квадратические отклонения, аномалии величин, повторяемость. Всего использовались данные восьми метеостанций.

Для выделения систематической составляющей изменений биометеорологических индексов для всех месяцев года построены линейные тренды для всех метеостанций:

$$y(\tau) = a\tau + v, \quad (1)$$

где $y(\tau)$ – сглаженное значение индекса на момент времени τ ($\tau = 1, 2, \dots, n$), a – угловой коэффициент наклона линии тренда (КНЛТ), характеризующий скорость изменения индекса, v – свободный член. Положительное значение коэффициента a указывает на рост биометеорологического показателя.

Статистическая значимость линейного тренда оценивалась с помощью критерия Стьюдента и по величине квадрата коэффициента корреляции R^2 (коэффициент детерминации). Величина R^2 показывает, каков вклад линейного тренда в общую изменчивость параметра. Тенденция изменения индекса считалась статистически значимой, если ее уровень достоверности был равен или превышал 95% ($p \geq 0.95$). При объеме выборки в 54 года это соответствует величине $R^2 > 0.08$.

Учитывая тот факт, что в период с 1961 г. до середины 70-х годов температура воздуха преимущественно понижалась, а в последующие годы стала расти, дополнительно для анализа временных рядов биометеорологических индексов использовался полиномиальный тренд 6 степени, что позволило выявить нелинейный характер процесса. Предварительное исследование по аппроксимации временных рядов с помощью полиномов 4-й, 5-й и 6-й степени показало, что наилучшее приближение к фактическому распределению индексов дает полином 6-й степени, коэффициент детерминации у которого несколько выше, чем у других, то есть выше степень достоверности. Кроме того, линейный тренд строился и для более короткого и однородного периода: с 1980 до 2014 г. В статье в качестве примера приведены результаты сглаживания отдельных индексов.

Результаты и их обсуждение

Степень комфортности условий погоды в отечественной и зарубежной практике часто оценивается с помощью биометеорологических индексов, которые являются косвенными индикаторами оценки состояния окружающей человека среды, характеризуя в физическом отношении особенности ее тепловой

структуры [11]. Воздействие высоких температур и повторяемости душных погод на человека рекомендуется исследовать с использованием **эффективной температуры ЭТ**, впервые предложенной в работе [12] и представленной формулой:

$$ЭТ = T - 0.4(T - 10)(1 - (f/100)), \quad (2)$$

где T – температура воздуха, °С; f – относительная влажность воздуха, %.

$ЭТ$ 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. Значимость $ЭТ$ как биоклиматического показателя состоит в том, что его можно использовать как для теплого, так и для холодного сезонов года (табл. 1). Зона комфорта по значениям эффективной температуры находится в пределах значений индекса 22.5–24.5 [13].

Табл. 1

Теплоощущения человека в зависимости от значений $ЭТ$ (°С) [13]

+ $ЭТ$	> 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		

Значения $ЭТ$ в большей степени зависят от температуры воздуха, чем от влажности, и повторяют пространственное распределение температуры, незначительно увеличиваясь с севера на юг (зимой изотермы ориентированы с северо-востока на юго-запад, летом максимум наблюдается на юго-востоке Удмуртии). В январе среднемесячные величины $ЭТ$ составляют –12.6 °С на севере (Глазов), –11.3 °С на юго-западе территории (Можга), в июле 17.2 °С на севере, 18.1 °С на юго-востоке (Сарапул). Разница между северными и южными районами составляет в среднем 1 °С. Комфортным для населения Удмуртии можно назвать климат лишь с апреля по октябрь, когда среднемесячные значения $ЭТ$ выше нуля. В зимние месяцы $ЭТ$ на 1.5–2.0 °С выше значений температуры воздуха, летом эффективная температура ниже температуры воздуха в среднем на 1.0 °С.

Межгодовая изменчивость $ЭТ$ в целом меньше изменчивости температуры воздуха. Она минимальна летом: среднее квадратическое отклонение (СКО) σ в июле – сентябре равно 1.5 °С, и максимальна в декабре – феврале, когда σ достигает 3.5 °С.

Наибольшая повторяемость в году принадлежит градации 0...–12 °С (холодно) – 98 дней с умеренной тепловой нагрузкой. В период с ноября по февраль она встречается в 50–60% случаев. Значительна и повторяемость сильной

угрозы обморожения: в последнее десятилетие она встречается в январе и феврале в 40–45% случаев. Очень сильная нагрузка с ощущением «крайне холодно» случается нечасто: в 4–5% случаев в январе и в 1% случаев в декабре и феврале. Эффективная температура $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже – редкое для последних лет явление, которое встречалось в Глазове и Ижевске лишь 15–16 декабря 2009 г. в условиях адвекции сухой арктической воздушной массы в восточной периферии антициклона. Даже срочные значения $ЭТ$ в Ижевске достигали столь низких значений за последние 10 лет всего несколько раз: 16, 17 и 20 января 2006 г., 15–17 декабря 2009 г., 21 февраля 2010 г. в Ижевске и несколько чаще в Глазове, который располагается на севере республики.

В период с мая по август наибольшая повторяемость теплового ощущения человека находится в градации «умеренно тепло». В половине случаев в июле и каждый третий день в июне и августе по теплоощущению оцениваются как «тепло». Жаркая погода со среднесуточными величинами $ЭТ$ $24\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается редко: в 2010 г. в условиях блокирующего антициклона отмечилось в среднем 5–10 дней за лето с умеренной тепловой нагрузкой, в 2015 г. умеренная нагрузка наблюдалась во второй декаде июня. Стоит отметить, что $ЭТ$ выше $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ нередко встречается в часы максимального прогрева, но даже в 2010 г. срочные величины $ЭТ$ ни разу не превышали $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, достигая лишь $28\text{--}29\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В переходную часть года теплоощущения человека, согласно эффективной температуре, изменяются от прохладных и умеренных с комфортной нагрузкой до холодных с умеренной нагрузкой.

КНЛТ всех месяцев на территории Удмуртии имеют положительный знак, изменяясь в пределах от $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет до $0.67\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет, что говорит об увеличении комфортности климата региона. Наибольших значений коэффициент наклона линейного тренда достигает в январе, эффективная температура увеличивается со скоростью $0.75\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет при коэффициенте детерминации $R^2 = 0.11$. $ЭТ$ января за рассматриваемый период на всех станциях заметно увеличилась, средние теплоощущения от «очень холодно» изменились к «холодно». Наименьшие статистически значимые КНЛТ отмечаются в августе: $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Линейная аппроксимация хорошо описывает временные изменения в январе, марте, июне, августе и октябре, коэффициенты детерминации в эти месяцы статистически значимы более чем на половине метеостанций. В остальных случаях показатель R^2 статистически незначим, и ход эффективной температуры подчиняется более сложной закономерности. В целом временные изменения эффективной температуры повторяют ход температуры воздуха: изменчивость максимальна в холодный период, незначительна в теплый.

В подвижном воздухе (при $V > 0.2$ м/с) интенсивность теплоотдачи усиливается, порядок уровня и структура теплоощущения изменяются. Для учета комплексного влияния на человека температуры, ветра и влажности применяется **эквивалентно-эффективная температура ($ЭЭТ$)**.

$ЭЭТ$ представляет собой сочетание метеовеличин, производящее тот же тепловой эффект, что и неподвижный воздух при 100%-ной относительной влажности и определенной температуре, и оценивает теплоощущение обнаженного по пояс человека [13]. Расчеты $ЭЭТ$ производятся по формуле А. Миссенарда:

$$\text{ЭЭТ} = 37 - \frac{37 - t}{0.68 - 0.0014f + \frac{1}{1.76 + 1.4v^{0.75}}} - 0.29f \left(1 - \frac{f}{100}\right), \quad (3)$$

где t – температура воздуха, °С; v – скорость ветра, м/с; f – относительная влажность, %.

Установлено, что данный показатель наиболее хорошо отражает влияние климатических условий на состояние человека. Изменение ряда физиологических функций организма идет параллельно с изменением значений эквивалентно-эффективной температуры ЭЭТ (табл. 2) [13, 14].

Табл. 2

Классификация тепловой чувствительности по значениям ЭЭТ – эквивалентно-эффективной температуры

ЭЭТ, °С	Уровень комфорта
Более 30	Тепловая нагрузка сильная
24...30	Тепловая нагрузка умеренная
18...24	Комфортно – тепло
12...18	Комфорт (умеренно тепло)
6...12	Прохладно
0...6	Умеренно прохладно
-6...0	Очень прохладно
-6...-12	Умеренно холодно
-12...-18	Холодно
-18...-24	Очень холодно
Менее -24	Начинается угроза обморожения

Согласно предложенной Миссенардом формуле среднемесячные значения тепловой чувствительности человека варьируются от умеренно теплой летом до опасной с угрозой обморожения в зимние месяцы. Зимой средние показатели ЭЭТ изменяются от -30.4 °С на севере (Глазов) до -26.1 °С на юго-западе (Можга). Летом пространственная изменчивость ЭЭТ в два раза ниже: в июле минимум наблюдается на северо-востоке +11.9 °С (Дебесы) – «прохладно», максимум на юго-востоке +13.3 °С (Сарапул) – «умеренно тепло». В отдельные годы среднемесячные ЭЭТ в зимнее время достигали значений -4 °С (1972 г.), а в летнее время не превышали значений +2.0 °С в июне (в 1979 г.), при котором тепловая чувствительность человека характеризуется как умеренно прохладная. Максимальные значения среднемесячных величин ЭЭТ летом за рассматриваемый период не достигали порога +18 °С, а зимой даже в самые теплые месяцы тепловая чувствительность не превышает порога «холодно». Пространственное распределение индекса в пределах региона повторяет распределение температуры и показателя ЭТ.

Изменчивость ЭЭТ выше изменчивости температуры воздуха и ЭТ : величина СКО максимальна в январе (4.6 °C), летом она практически в два раза ниже (2.4 °C).

Зимой среднесуточные величины ЭЭТ изменяются в пределах от –40...–45 °C, местами до –54 °C, до –1...–3 °C в декабре и феврале. Летние значения индекса колеблются от минимальных 3...7 °C до максимальных 22...25 °C. Даже в самый жаркий месяц в году существует вероятность умеренно прохладной и очень прохладной погоды.

Из анализа среднесуточных величин индекса на территории Удмуртии следует, что все разнообразие тепловой чувствительности человека представлено в течение года почти всеми градациями. В регионе не встречаются дни с сильной тепловой нагрузкой (повторяемость равна 0), крайне редко достигается умеренная тепловая нагрузка 24–30 °C, комфортная теплая погода (18–24 °C) наблюдается в среднем 11 дней в году, более низкие градации встречаются почти с одинаковой повторяемостью – 30–50 дней за год.

В январе и феврале практически каждый второй день существует угроза обморожения (повторяемость $\text{ЭЭТ} < -24$ °C равна 50–60%). Самые низкие срочные значения индекса встречаются в основном в утреннее время, реже вечером и ночью, иногда днем. Это происходит при температуре воздуха –29...–36 °C, влажности 60–75% и скорости ветра 3–6 м/с. Наиболее экстремальные показатели (–54 °C) в Ижевске наблюдались за последние 10 лет 16 и 17 января 2006 г. и 29 января 2014 г. – при ультраполярном вторжении сухой арктической воздушной массы.

Умеренная тепловая нагрузка со среднесуточными значениями индекса 24–30 °C – крайне редка для региона, в Ижевске за последние десять лет зафиксирован лишь один случай – 31 июля 2010 г. Однако в отдельное время дня в регионе может наблюдаться умеренная тепловая нагрузка на фоне общего комфортного уровня. Подобные условия случаются в жаркую погоду с температурным фоном 25–35 °C, относительной влажностью 20–70% и в основном при слабой скорости ветра – от штиля до 4 м/с. Но даже самые высокие срочные значения ЭЭТ за последние десять лет ни разу не достигали 30 °C (срочный максимум равен 28 °C).

Коэффициенты наклона линейного тренда на большинстве метеостанций статистически значимы в течение всего года и свидетельствуют об увеличении ЭЭТ по Миссенарду во времени. Наибольший вклад в годовое повышение вносит холодный период (с октября по март), средняя скорость a равна 0.98 °C/10 лет. Особенно быстро увеличивается индекс в январе: 1.4 °C/10 лет, что объясняется повышением температуры воздуха и ослаблением средней скорости ветра, в летний период ЭЭТ по Миссенарду растет почти в два раза медленнее, чем в зимний: 0.56 °C/10 лет, наименьшая скорость наблюдается в июле: 0.43 °C/10 лет.

На рис. 1 в качестве примера представлен временной ряд эквивалентно-эффективной температуры (ЭЭТ) за 1961–2014 гг., подвергнутый аппроксимации полиномом шестой степени, что равносильно сглаживанию ряда, что позволило отфильтровать короткопериодные колебания, оставив только длиннопериодные (климатические). Линейные тренды представлены для всего периода

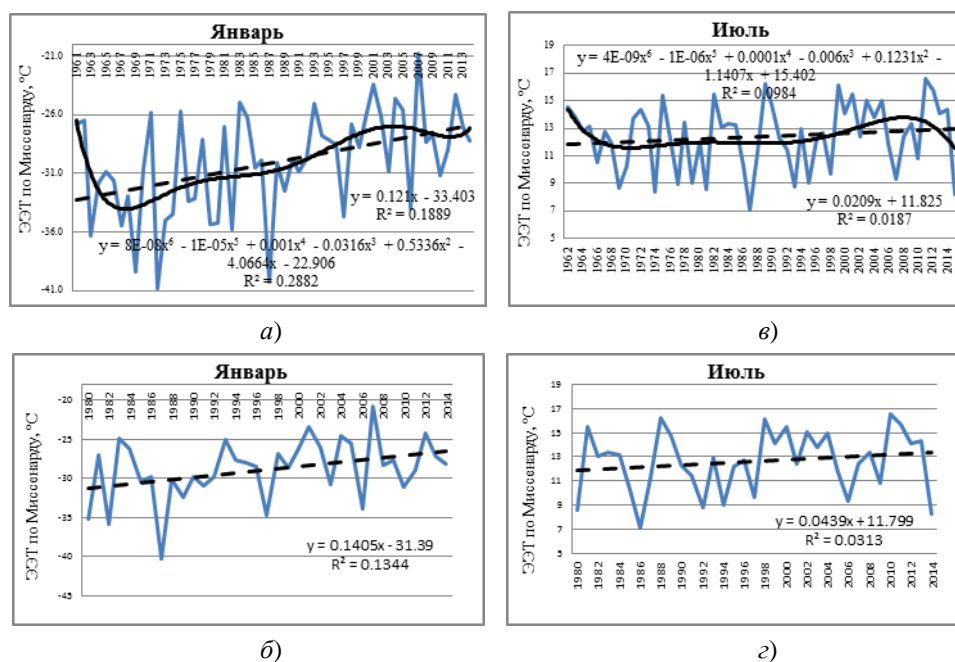


Рис. 1. Изменения среднеянварской (а) и среднеиюльской (в) эквивалентно-эффективной температуры (ЭЭТ) в Ижевске (1961–2014 гг.), линейные тренды ЭЭТ для января (б) и июля (г) (1980–2014 гг.)

и для последних 34 лет, когда наблюдалась активная фаза потепления. Как видно из рис. 1, в январе отмечается хорошо выраженная тенденция роста величин ЭЭТ, что свидетельствует о смягчении зимних климатических условий. В июле отмечается лишь слабая, статистически незначимая тенденция роста ЭЭТ, то есть летние условия мало меняются за исследуемый период.

Биоклиматические показатели холодного периода. Для рекреационной оценки холодного периода был рассчитан индекс суровости погоды по Бодману, определяющий условия, способствующие обморожению. Он характеризуется низкой температурой воздуха и скоростью ветра, которые особенно влияют на охлаждение незащищенной одеждой поверхности тела человека и на органы дыхания, и рассчитывается по формуле [13]:

$$S = (1 - 0.04t)(1 + 0.27v), \quad (4)$$

где S – индекс суровости, баллы; t – температура воздуха, °С, v – скорость ветра, м/с.

Согласно шкале Бодмана, если $S = 1$, то зима мягкая, несуровая; $S = 1-2$ – зима мало суровая; $S = 2-3$ – зима умеренно суровая; $S = 3-4$ – зима суровая; $S = 4-5$ – зима очень суровая; $S = 5-6$ – зима жестко суровая; $S > 6$ – зима крайне суровая (баллы в изложении опускаются).

На севере республики в течение всего холодного периода индекс Бодмана характеризует зиму как умеренно суровую ($S = 2.0-2.1$), на юге зима мало суровая ($S = 1.8-1.9$). В центральных районах Удмуртии начало и конец холодного периода мало суровые, период с ноября по февраль – умеренно суровый. В течение

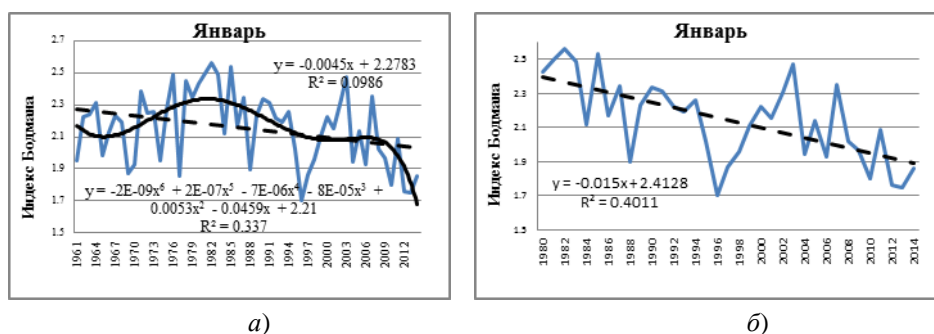


Рис. 2. Изменения индекса Бодмана в январе в Ижевске за периоды: а) 1961–2014 гг. и б) 1980–2014 гг.

изучаемого периода лишь на метеостанции Селты в 1983 г. ноябрь был отмечен как суровый из-за среднемесячной скорости ветра, достигший 7.1 м/с.

Среднесуточные значения индекса Бодмана варьируются с октября по март в пределах от 1.1 до 3.5, характеризую условия в холодную половину года от мало суровых до суровых. Значения индекса менее 1,0 встречаются крайне редко в апреле и октябре. Умеренно суровая ($S = 2-3$) погода встречается в Удмуртии 97 дней в году, суровые условия ($S = 3-4$) возникают в среднем 4 дня в году. Среднесуточные значения индекса Бодмана выше 4.0 в Удмуртии за последние 10 лет не фиксировались, однако в отдельные сроки погодные условия могут быть очень суровыми и жестко суровыми. Значения более 4, как правило, фиксируются при относительно мягкой для местной зимы температуре воздуха (в среднем $-3...-5$ °C) и высоких скоростях ветра (11–12 м/с и более, но не менее 10 м/с), то есть скорость ветра в данном показателе играет первостепенную роль.

Самое высокое срочное значение индекса Бодмана за последние 10 лет не превышало 5.5. Это означает, что даже в короткие периоды времени условий для крайне суровой погоды в регионе в последние годы не наблюдается.

Чаще всего в регионе встречается мало суровая погода – в Ижевске в 50–60% случаев, в Глазове – в 60–70%. Дни с умеренно суровой погодой наблюдаются в период с декабря по февраль в 40–50% случаев, в переходные месяцы – в 30–40%. Дни с суровыми условиями в Ижевске происходят чаще, чем в Глазове, максимальная повторяемость принадлежит январю: 4% случаев (в Глазове 2%).

Индекс суровости погоды по Бодману уменьшается со временем: в 70-х годах XX в. на юге региона его значения соответствовали «умеренно суровой зиме». В XXI в. прослеживается тенденция к смягчению холодного периода – средние индексы суровости равны 1.8–1.9 на севере Удмуртии и 1.6–1.7 на юге – зима в целом становится мало суровой. Лишь в Ижевске индекс выше: 2.0–2.1.

Как видно из рис. 2, индекс Бодмана сильно понижается, что свидетельствует об ослаблении суровости зим, при этом КНЛТ статистически значимы для обоих периодов, а сглаживающая кривая, представленная полиномом 6-й степени, указывает на возможную цикличность в ряду, однако для обнаружения скрытых периодов ряд желательно удлинить.

Для оценки холодного сезона используется индекс **охлаждения Хилла** H_w (Вт/м²·с), рассчитываемый по формуле [13]:

$$H_w = (0.13 + V^{0.5})(36.6 - t) + (0.85 + 0.0102 V^{0.3})(61.1 - e)^{0.75}, \quad (5)$$

где t – температура среды, °С, V – скорость ветра, м/с, e – упругость водяного пара, гПа.

Биоклиматический индекс H_w характеризует интенсивность потери тепла материальным телом или человеческим организмом в воздушном потоке с определенной температурой и влажностью. При невысоких положительных, а также при отрицательных температурах воздуха влажный ветровой поток усиливает дискомфортное состояние человеческого организма. При высоких положительных температурах воздействие влажного ветрового потока уменьшает состояние дискомфорта человека [14]. При $H_w = 4.5$ – 5.5 Вт/(м²·с) погодные условия зимы считаются дискомфортными, при $H_w > 8$ Вт/(м²·с) – абсолютно дискомфортными.

Индекс влажного ветрового охлаждения Хилла максимален в январе и декабре: 52–54. На севере республики его средние значения достигают 56, на юге равны 49. В отдельные годы январские величины колеблются от 35 до 74. Наименьшие величины за холодную половину года наблюдаются в октябре: от 35.5 на юге до 41 на севере региона.

В биоклиматических исследованиях для оценки теплового состояния человека в холодный период используется следующий показатель – **приведенная температура**, предложенный К.Ш. Хайруллиним и В.Н. Адаменко. Он характеризует теплопотери человека в зависимости от сочетания фактических значений температуры и скорости ветра, приравненных к теплопотерям при той же температуре воздуха, но в условиях безветрия [15]. Приведенная температура рассчитывается по формуле:

$$t_{\text{прив}} = t_{\text{в}} - 8.2V, \quad (6)$$

где $t_{\text{прив}}$ – приведенная температура, °С; $t_{\text{в}}$ – фактическая температура воздуха, °С; V – скорость ветра, м/с.

Формулу целесообразно использовать лишь в холодный период года, так как летом при умеренных скоростях ветра значения индекса оказываются гораздо ниже нуля. Например, при температуре воздуха 20 °С и скорости ветра 8 м/с расчетное значение индекса равно –44 °С.

Степень дискомфорта оценивается следующим образом:

$t_{\text{прив}} < -17$ °С – ограничение пребывания на открытом воздухе больных людей;

$t_{\text{прив}} < -28$ °С – слабый дискомфорт;

$t_{\text{прив}} < -32$ °С – жесткий дискомфорт;

$t_{\text{прив}} < -42$ °С – полное прекращение пребывания на воздухе.

В октябре уже в центральных и северных районах Удмуртии появляются условия, когда степень дискомфорта оценивается как слабая ($t_{\text{прив}} = -28$... -29 °С), в южных районах значение индекса в среднем не выше -21 ... -22 °С. В ноябре на юге региона $t_{\text{прив}} = -28$... -29 °С, в центральных и северных районах $t_{\text{прив}} = -32$... -37 °С – условия соответствуют жесткому дискомфорту.

Наиболее низких значений индекс достигает в период с декабря по февраль и в среднем равен -39 ... -41 °С. Пространственная изменчивость показателя в этот период также максимальна, достигая в среднем 11 °С: в северных и центральных районах средний показатель характеризует климат наиболее жестко –

значения $t_{\text{прив}} < -42$ °С, в южных районах в зимние месяцы степень дискомфорта соответствует ослаблению ситуации.

Условия слабого дискомфорта обычно сохраняются до апреля, а в отдельные годы могут наблюдаться и в мае.

Следует отметить, что в ряде случаев даже в октябре и марте климатические условия могут оцениваться как жесткие ($t_{\text{прив}} < -42$ °С). Но встречаются годы, в течение которых степень дискомфорта отдельных зимних месяцев оценивается как слабая.

Среднесуточные значения индекса в зимнее время изменяются в широких пределах и могут достигать $-70 \dots -90$ °С. Наиболее низкие значения индекса наблюдаются как при температуре воздуха ниже -30 °С и скорости ветра $6-7$ м/с, так и при температурах воздуха, близких к нулю, и скорости ветра $10-11$ м/с и более.

Наиболее суровые погодные условия с полным прекращением пребывания на воздухе наблюдаются в Удмуртии 45 дней в году. В основном они встречаются в период с декабря по февраль со средней повторяемостью $20-35\%$. Жесткий дискомфорт со значением индекса ниже -32 °С характерен для периода с декабря по февраль со средней повторяемостью 30% . В ноябре и марте подобные условия наблюдаются в 20% случаев.

При скоростях ветра от 13 м/с и более индекс даже на фоне температуры воздуха, близкой к нулю, принимает значения ниже -100 °С.

Кроме индивидуальных биоклиматических индексов широкое распространение нашел комплексный показатель I для оценки степени патогенности метеорологической ситуации, предложенный В.Г. Бокшей [16]. Он используется для оценки степени раздражающего действия изменений погоды на организм и представляет собой сумму индексов патогенности разных метеорологических величин:

$$I = I_t + I_h + I_v + I_n + I_{\Delta p} + I_{\Delta t}, \quad (7)$$

где I_t – индекс патогенности температуры воздуха; $I_t = 0.02(18 - t)^2$ при t , меньшей или равной 18 °С; $I_t = 0.02(t - 18)^2$ при $t > 18$ °С; t – среднесуточная температура, °С; $I_{\Delta t}$ – индекс патогенности межсуточного изменения температуры Δt ; I_h – индекс патогенности влажности воздуха; h – среднесуточная относительная влажность (%); I_v – индекс патогенности ветра; v – среднесуточная скорость ветра (м/с); I_n – индекс патогенности облачности, которую определяют по 11-балльной системе: 0 соответствует полному отсутствию облаков, 10 баллов – сплошной облачности, n – балл облачности; $I_{\Delta p}$ – индекс патогенности межсуточного изменения атмосферного давления Δp .

На практике используют следующую рабочую формулу для расчета индекса патогенности метеорологической ситуации (баллы):

$$I = 10^{(h-70)/20} + 0.2v^2 + 0.06n^2 + 0.06(\Delta p)^2 + 0.3(\Delta p)^2 + I_t. \quad (8)$$

Согласно [13], комфортные условия, при которых возникает минимум метеопатических реакций, определяются следующими значениями метеорологических величин: температурой воздуха 18 °С, относительной влажностью 50% , нулевой скоростью ветра, облачностью 0 баллов, межсуточными изменениями температуры и давления, равными нулю.

В.Г. Бокша приводит следующие три градации индекса патогенности метеорологической ситуации [16, 17]:

Индекс патогенности I	0–9	10–24	> 24
Условия погоды	Оптимальные (комфортные)	Раздражающие	Острые

Расчет составляющих формулы (8) производился по данным срочных метеонаблюдений на станциях Ижевск (центр региона) и Глазов (север республики) в период с 2005 по 2015 г. Среднесуточные значения метеорологических величин менялись за этот период в пределах: температура воздуха от $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $29\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 26–99%, скорость ветра от 0 до 11 м/с, облачность 0–10 баллов. Межсуточные изменения давления достигали 32 гПа, а температуры воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Индекс патогенности характеризует в целом погодные условия Удмуртской Республики преимущественно как острые со значением более 24 (см. табл. 3).

Табл. 3

Распределение числа дней в году по градациям индекса патогенности I

Индекс I	0–9	10–24	> 24
Количество дней	85	129	152

Острые погодные условия формируются в холодную половину года. В связи с повышенной активностью синоптических процессов происходит быстрое перемещение воздушных масс и атмосферных фронтов, что приводит к значительным изменениям метеорологических величин. В этот период отмечается низкий температурный фон и высокая относительная влажность. Повторяемость изменений температуры воздуха от $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше максимальна именно в холодный период, а средняя межсуточная изменчивость температуры зимой колеблется в пределах $2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что заметно больше, чем летом; отдельные перепады ее в холодный период могут достигать $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18].

Среднемесячные значения индекса патогенности в период с ноября по февраль выше 24, в январе они достигают 42–44 (рис. 3). В период с декабря по февраль в 90–98% случаев метеорологическая ситуация оценивается как острая, в редких случаях как раздражающая. Комфортных условий погоды с ноября по март не наблюдается.

Острые погодные условия наблюдаются при ультраполярном вторжении в тыловую часть циклона. Так, 7 января 2015 г. произошли резкие изменения всех метеопараметров: за сутки похолодало на $19\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление увеличилось на 16 гПа, среднесуточная температура воздуха составила $-24.6\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этих условиях индекс патогенности достиг максимального значения 168 главным образом за счет величины индекса патогенности межсуточного изменения температуры $I_{\Delta t} = 107.7$.

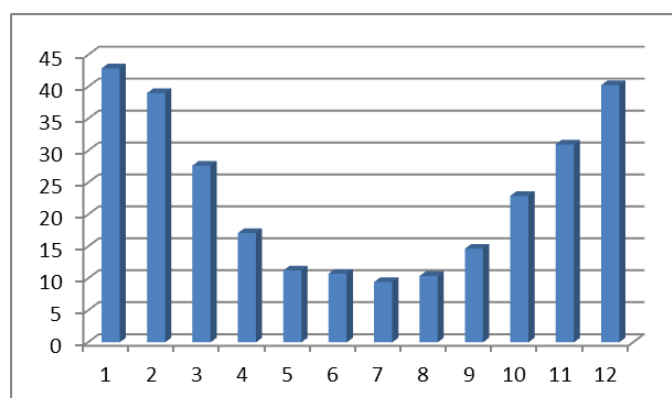


Рис. 3. Годовой ход средних значений индекса патогенности в Удмуртской Республике

Весной (в марте и апреле) в условиях увеличения количества приходящей солнечной радиации, роста температуры воздуха, уменьшения облачности и относительной влажности погодные условия смягчаются. В марте еще преобладает погода с острыми условиями (повторяемость 55–60%). Значения индекса патогенности апреля характеризуют погоду преимущественно как раздражающую, однако при возврате холодов, а также в облачную, влажную и ветреную погоду могут возникать острые условия с повторяемостью 15–20%.

Погода летнего периода в Удмуртской Республике оценивается как наиболее благоприятная – циклоническая деятельность ослабевает, увеличивается количество солнечных дней, повышается температурный фон, понижается относительная влажность и ослабевает сила ветра. Среднемесячные значения индекса патогенности в период с мая по август равны 9–11. Комфортная погода встречается более чем в половине случаев (повторяемость 50–60%), однако довольно часто могут наблюдаться и раздражающие погодные условия – в 35–45%, а в отдельных редких случаях и острые. Самые высокие значения I в летний период (40–48) встречаются в условиях понижения температуры на 5–10 °С до значений 10–15 °С в облачную и влажную погоду.

Осенью в Удмуртии уменьшается радиационный баланс, активизируется циклоническая деятельность, увеличивается количество облачности, растет сила ветра, погода становится более переменной. Индекс патогенности характеризует погодные условия в сентябре и октябре как раздражающие (повторяемость 50–60%). В сентябре увеличивается повторяемость возникновения острых условий погоды – до 10–15% случаев, в октябре они наблюдаются в 40–45% случаев. Но и комфортные условия пока еще могут встречаться – в 20–30% случаев в сентябре и 5–8% в октябре.

Значения индексов патогенности для разных метеорологических величин приводятся в табл. 4. Основной вклад в суммарный I холодного периода вносит индекс патогенности температуры воздуха I_t и в меньшей степени индекс межсуточного изменения температуры $I_{\Delta t}$. В переходные месяцы вклад индекса патогенности температуры воздуха уменьшается, летом вклад индексов становится равноценен, но больший вклад принадлежит индексу патогенности облачности (радиации) I_n , а также индексу патогенности влажности воздуха I_h и межсуточного изменения температуры воздуха $I_{\Delta t}$.

Табл. 4

Индекс патогенности метеорологической ситуации для станций Ижевск и Глазов в период 2005–2015 гг.

Месяцы	Метеостанции	Индекс патогенности						Суммарный индекс I
		I_t	I_h	I_v	I_n	$I_{\Delta p}$	$I_{\Delta t}$	
1	Ижевск	20.9	4.6	2.7	4.1	2.2	7.1	41.7
	Глазов	22.0	5.0	2.2	4.1	2.3	8.5	44.1
2	Ижевск	20.9	3.3	2.7	4.1	2.2	7.1	40.4
	Глазов	20.8	3.5	2.0	3.5	2.1	5.7	37.6
3	Ижевск	10.8	3.3	3.3	3.7	3.3	2.8	27.1
	Глазов	11.4	3.6	2.7	3.7	3.4	3.3	28.2
4	Ижевск	4.2	2.1	2.9	3.4	2.0	2.1	16.7
	Глазов	4.5	2.7	2.3	3.5	2.0	2.1	17.2
5	Ижевск	0.9	0.9	2.5	2.8	1.3	3.0	11.4
	Глазов	1.1	1.1	1.7	3.0	1.3	2.9	11.1
6	Ижевск	0.4	1.9	2.1	3.0	0.9	2.6	10.9
	Глазов	0.4	2.3	1.2	3.2	1.0	2.5	10.6
7	Ижевск	0.4	2.4	1.6	2.8	0.7	1.6	9.6
	Глазов	0.3	2.8	0.7	3.1	0.7	1.7	9.3
8	Ижевск	0.4	2.9	1.6	3.1	0.8	1.7	10.5
	Глазов	0.4	3.4	0.8	3.1	0.8	1.7	10.3
9	Ижевск	1.2	4.6	1.8	3.7	1.2	1.9	14.3
	Глазов	1.4	5.4	1.3	3.9	1.2	1.9	15.0
10	Ижевск	4.6	6.1	3.0	4.3	2.5	2.2	22.7
	Глазов	5.0	6.7	2.2	4.5	2.7	2.1	23.2
11	Ижевск	9.3	8.1	3.3	4.9	2.7	2.7	31.0
	Глазов	9.7	7.8	2.4	5.1	2.9	3.1	31.0
12	Ижевск	15.9	7.1	3.1	4.7	3.4	5.5	39.7
	Глазов	16.4	7.0	2.5	4.8	3.4	6.7	40.8

Острые условия погоды ($I > 24$), согласно данным табл. 4, характерны для холодной половины года, основной вклад в I зимой принадлежит индексам патогенности температуры воздуха и межсуточного изменения температуры. Комфортных погодных условий с ноября по март не наблюдается.

Погода летнего периода в Удмуртской Республике оценивается как наиболее благоприятная – более чем в половине случаев наблюдаются комфортные условия. Основной вклад в общее значение индекса патогенности летом вносит индекс патогенности облачности (радиации), в меньшей степени индекс патогенности влажности воздуха I_h и межсуточного изменения температуры воздуха $I_{\Delta t}$. В редких случаях летом возникают острые погодные условия при похолодании в условиях облачной и влажной погоды.

В переходные месяцы преобладают раздражающие погодные условия, но могут встречаться как острые, так и комфортные условия погоды.

Заключение

Анализ распределения эффективной температуры ($ЭТ$) на территории Удмуртской Республики показывает, что в холодный период (ноябрь – февраль) на градацию 0...–12 °С (холодно) приходится 50–60% случаев, характеризую-

щих состояние человека с умеренной тепловой нагрузкой. В последнее десятилетие (2005–2014 гг.) в связи с понижением температуры воздуха в январе и феврале и более высокой вероятностью появления градации $-12\dots-24$ °С заметно возросла угроза обморожения (40–45% случаев) и лишь в 4–5% случаев в январе возникает ситуация с ощущением «крайне холодно».

В теплый период (май – август) чаще всего встречается умеренно-теплая градация эффективной температуры $18\dots12$ °С, и состояние человека отмечается как комфортное. В половине случаев в июле и каждый третий день в июне и августе характеризуются градацией ЭТ $24\dots18$ °С (тепло). Все это создает преимущественно комфортные условия для проживания населения.

Эквивалентно-эффективная температура (ЭЭТ) изменяется на территории Удмуртской Республики как в зимний, так и в летний периоды в широких пределах: зимой среднесуточные значения ЭЭТ изменяются от -54 °С до -1 °С, летом от 3 °С до 25 °С, что создает предпосылки для формирования всех видов тепловой нагрузки – от умеренной (летом) до угрозы обморожения.

Согласно расчетам индекса суровости погоды по Бодману, умеренно суровая погода встречается 97 дней в году, суровые условия возникают значительно реже, примерно 4 дня в году. Оценка степени дискомфорта состояния человека с помощью «приведенной температуры» Хайруллина – Адаменко показывает, что наиболее суровые погодные условия при наличии сильных ветров, при которых рекомендуется прекращение пребывания на открытом воздухе, достигают в Удмуртии 45 дней в году. Жесткий дискомфорт со значением индекса ниже -32 °С характерен для периода декабрь – февраль со средней повторяемостью 30%.

Анализ рассчитанных индексов патогенности для различных метеорологических величин показал, что в зимний период основной вклад в интегральный показатель вносят индекс патогенности температуры и индекс межсуточного изменения температуры воздуха, в летний период в большей степени сказывается влияние индексов патогенности облачности, влажности и межсуточного изменения температуры. Острые условия погоды по интегральному показателю ($I > 24$) формируются в зимний период, комфортные ($0 \leq I \leq 9$) – в летний.

В целом биоклиматические условия, что следует из проведенного анализа, на территории Удмуртии улучшаются: повторяемость жестких условий зимой уменьшается, а летом рост температуры не столь значителен и сохраняется в зоне комфорта.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-06349).

Литература

1. Ревич Б.А., Малеев В.В. Изменения климата и здоровье населения России: анализ ситуаций и прогнозные оценки. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – 208 с.
2. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. – М.: Росгидромет, 2014. – 1008 с.

3. Ревич Б.А., Шапошников Д.А. Изменения климата, волны жары и холода как факторы риска повышенной смертности населения в некоторых районах России // Проблемы прогнозирования. – 2012. – № 2. – С. 122–138.
4. Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года: Сб. докл. / Под ред. Н.П. Шакиной. – М.: Триада, ЛГД. – 2011. – 72 с.
5. Верещагин М.А., Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Тудрий В.Д. Факторный анализ многолетней динамики глобального термического режима приземного слоя атмосферы // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2004. – № 5. – С. 34–41.
6. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Наумов Э.П., Верещагин М.А. Особенности проявления современного потепления климата в тропосфере Атлантико-Европейского региона // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 2. – С. 38–47.
7. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Наумов Э.П., Верещагин М.А., Николаев А.А. Региональные проявления современного потепления в тропо – стратосфере Северного полушария // Изв. РАН. Сер. геогр. – 2005. – № 6. – С. 6–16.
8. Переведенцев Ю.П., Гоголь Ф.В., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Динамика полей температуры воздуха Северного полушария в современный период // Проблема анализа риска. – 2007. – Т. 4, № 1. – С. 73–80.
9. Переведенцев Ю.П., Шарипова Р.Б. Изменение основных климатических показателей на территории Ульяновской области // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2012. – № 6. – С. 136–144.
10. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Важнова Н.А. Пространственно-временные изменения основных показателей температурно-влажностного режима в Приволжском Федеральном Округе // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 4. – С. 32–48.
11. Емелина С.В., Константинов П.Н., Малинина Е.П., Рубинштейн К.Г. Оценка информативности некоторых биометеорологических индексов для разных районов России // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 7. – С. 25–37.
12. Missenard A. L’homme et le climat. – Paris, 1937. – 186 p.
13. Исаев А.А. Экологическая климатология. – М.: Науч. мир, 2001. – 456 с.
14. Русанов В.И. Комплексные метеорологические показатели и методы оценки климата для медицинских целей. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. – 86 с.
15. Кобышева Н.В., Стадник В.В., Клюева М.В., Пигольцина Г.Б., Акентьева Е.М., Галюк Л.П., Разова Е.Н., Семенов Ю.А. Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики. – СПб., 2008. – 336 с.
16. Бокша В.Г., Богуцкий Б.В. Медицинская климатология и климатотерапия. – Киев: Здоровье, 1980. – 261 с.
17. Переведенцев Ю.П., Занди Р., Аухадеев Т.Р., Шанталинский К.М. Оценка влияния климата на человека в засушливых условиях юго-западного Ирана // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2015. – № 1. – С. 104–113.
18. Шумихина А.В. Повторяемость и динамика оттепелей в Ижевске // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2015. – № 4. – С. 129–136.

Поступила в редакцию
14.09.16

Переведенцев Юрий Петрович, доктор географических наук, профессор кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: ypereved@kpfu.ru

Шумихина Алла Валерьевна, аспирант кафедры метеорология, климатологии и экологии атмосферы

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *kamb2442@gmail.com*

ISSN 1815-6169 (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2016, vol. 158, no. 4, pp. 531–547

The Dynamics of the Bioclimatic Indices of Environmental Comfort in the Udmurt Republic, Russia

Yu.P. Perevedentsev^{*}, *A.V. Shumikhina*^{**}

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia
E-mail: **ypereved@kpfu.ru, **kamb2442@gmail.com*

Received September 14, 2016

Abstract

This paper provides a review of the biometeorological indices used to assess the degree of comfort of weather and climate conditions. Statistical calculations of the effective and equivalent effective temperature have been performed for eight weather stations in the Udmurt Republic (Russia) during the period of 1961–2014. The effect of varying weather conditions on the functional state of the human body has been revealed based on the indices of weather hardness and pathogenicity. It has been found that the weather conditions in the region of study are comfortable only in the summer period. In the winter period, they are either irritating or acute. Positive values of the coefficients of linear trend inclination prevail for most biometeorological indices, thereby showing that the weather conditions improved over the last decades. Sample calculations of the biometeorological indices have been given for the extreme weather situations.

Keywords: bioclimate, biometeorological indices, comfortable conditions, pathogenicity index, Udmurt Republic

Acknowledgments. The study was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 15-05-06349).

Figure Captions

Fig. 1. Changes in the average equivalent effective temperatures (EET) of January (*a*) and July (*c*) in Izhevsk (1961–2014), the linear trends of EET for January (*b*) and July (*d*) (1980–2014).

Fig. 2. Changes of the Bodman index for July in Izhevsk during the following periods: *a*) 1961–2014 and *b*) 1980–2014.

Fig. 3. Distribution of the number of days in the year by the pathogenicity index gradations in the Udmurt Republic.

Fig. 4. Annual changes in the average values of the pathogenicity index in the Udmurt Republic.

References

1. Revich B.A., Maleev V.V. Climate Change and Population Health in Russia: Analysis and Forecast. Moscow, LENAND, 2011. 208 p. (In Russian)
2. The Second Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Territory of the Russian Federation. Moscow, Rosgidromet, 2014. 1008 p. (In Russian)

3. Revich B.A., Shaposhnikov D.A. Climate change, heat waves, and cold spells as risk factors for increased mortality in some regions of Russia. *Stud. Russ. Econ. Dev.*, 2012, vol. 23, no. 2, pp. 195–207. doi: 10.1134/S1075700712020116.
4. Analysis of Abnormal Weather Conditions in Russia during the Summer of 2010. Collection of Reports. Shakina N.P. (Ed.). Moscow, Triada, 2011. 72 p. (In Russian)
5. Vereshchagin M.A., Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Tudrii V.D. Factor analysis of long-term dynamics of the global thermal regime of the surface air layer. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2004, no. 5, pp. 34–41. (In Russian)
6. Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Naumov E.P., Vereshchagin M.A. Features of modern climate warming in the troposphere of the European Atlantic region. *Meteorol. Gidrol.*, 2004, no. 2, pp. 38–47. (In Russian)
7. Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Naumov E.P., Vereshchagin M.A., Nikolaev A.A. Regional aspects of modern climate warming in the tropo-stratosphere of the Northern Hemisphere. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2005, no. 6, pp. 6–16. (In Russian)
8. Perevedentsev Yu.P., Gogol F.V., Naumov E.P., Shantalinskii K.M. Dynamics of air temperature fields in the Northern Hemisphere during the recent period. *Probl. Anal. Riska*, 2007, vol. 4, no. 1, pp. 73–80. (In Russian)
9. Perevedentsev Yu.P., Sharipova R.B. Changes of the basic climate indicators in the territory of Ulyanovsk region. *Vestn. Udmurt. Univ., Ser. Biol. Nauki Zemle*, 2012, no. 6, pp. 136–144. (In Russian)
10. Perevedentsev Yu.P., Shantalinskii K.M., Vazhnova N.A. Spatiotemporal variations of major parameters of temperature and humidity regime in the Volga Federal District. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, vol. 39, no. 4, pp. 228–239. doi: 10.3103/S1068373914040037.
11. Emelina S.V., Konstantinov P.N., Malinina E.P., Rubinshtein K.G. Evaluation of the informativeness of several biometeorological indices for three areas of the European part of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2014, vol. 37, no. 7, pp. 448–457. doi: 10.3103/S1068373914070036.
12. Missenard A. L'homme et le climat. Paris, 1937. 186 p.
13. Isaev A.A. Ecological Climatology. Moscow, Nauchn. Mir, 2001. 456 p. (In Russian)
14. Rusanov V.I. Complex Meteorological Indices and Methods of Climate Assessment For Medical Purposes. Tomsk, Izd. Tomsk. Univ., 1981. 86 p. (In Russian)
15. Kobysheva N.V., Stadnik V.V., Klyueva M.V., Pigol'tsina G.B., Akent'eva E.M., Galyuk L.P., Razova E.N., Semenov Yu.A. Manual for Specialized Climatological Services for Economy. St. Petersburg, 2008. 336 p. (In Russian)
16. Boksha V.G., Bogutsky B.V. Medical Climatology and Climatotherapy. Kiev, Zdorov'e, 1980. 261 p. (In Russian)
17. Perevedentsev Yu.P., Zandi R., Aukhadeev T.R., Shantalinskii K.M. Assessment of climate influence on a man in droughty conditions of southwest Iran. *Vestn. Udmurt. Univ., Ser. Biol. Nauki Zemle*, 2015, no. 1, pp. 104–113. (In Russian)
18. Shumikhina A.V. Repeatability and dynamics of thaws in Izhevsk. *Vestn. Udmurt. Univ. Ser. Biol. Nauki Zemle*, 2015, no. 4, pp. 129–136. (In Russian)

Для цитирования: Переведенцев Ю.П., Шумихина А.В. Динамика биоклиматических показателей комфортности природной среды в Удмуртской Республике // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2016. – Т. 158, кн. 4. – С. 531–547.

For citation: Perevedentsev Yu.P., Shumikhina A.V. The dynamics of the bioclimatic indices of environmental comfort in the Udmurt Republic, Russia. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2016, vol. 158, no. 4, pp. 531–547. (In Russian)