СОЗДАНИЕ КАРТ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ АТЛАСНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ УРАЛЬСКОГО ПРИКАМЬЯ»

Е.С. Черепанова, Л.Н. Ермакова, А.Н. Шихов

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь
cherepanova_es@rambler.ru, lnermak@psu.ru, and3131@inbox.ru

Аннотация. Биоклиматические индексы – это интегральные показатели, учитывающие совместное влияние нескольких элементов погоды и используемые для оценки теплоощущения человека. В настоящей работе для создания биоклиматических карт на территорию Пермского края использован набор климатических данных WorldClim 2.0 с высоким пространственным разрешением (30"). Предварительно для оценки пригодности данных WorldClim 2.0 проведена их верификация на основе сравнения с климатическими нормами по данным метеостанций. Результаты подтвердили удовлетворительный уровень точности данных WorldClim 2.0 для территории Пермского края. Максимальную точность имеют данные о температуре воздуха, несколько ниже точность данных о влажности воздуха и скорости ветра. Построенные карты отражают основные особенности пространственного распределения биоклиматических параметров по территории края, с учетом влияния свойств подстилающей поверхности. Созданные карты биоклиматических переменных опубликованы в открытом доступе в Атласной информационной системе «Опасные гидрометеорологические явления Уральского Прикамья».

Ключевые слова: биоклиматические индексы, эффективно-эквивалентные температуры, климатические карты, WorldClim 2.0, атласная информационная система.

Погодно-климатические условия являются важнейшим фактором окружающей среды, влияющими на жизнедеятельность человека. Выявление степени благоприятности погодных условий, территориальных зон комфорта осуществляется по значениям биоклиматических показателей (индексов). Биоклиматические индексы представляют собой интегральные показатели, учитывающие совместное влияние нескольких элементов погоды (температуры, влажности, скорости ветра, солнечной радиации) на теплоощущение человека. Расчет индексов позволяет выявить тенденции их изменений в пространстве и во времени, произвести территориальную дифференциацию биоклиматических условий.

Ранее для территории Пермского края уже создавались биоклиматические карты (Оборин и др., 2015). Однако эти карты были построены по климатическим нормам 1951–1980 гг., и уже не отражают современные климатические характеристики региона. Кроме того, при интерполяции были использованы данные всего с 9 метеостанций, также не учитывалось влияние факторов подстилающей поверхности. Таким образом, задача создания биоклиматических карт на основе более современных данных и с использованием корректных методов интерполяции, принятых в климатологии, является актуальной.

При построении климатических карт (включая и карты производных биоклиматических показателей) необходимо учитывать влияние факторов

подстилающей поверхности, особенно для территорий со сложным рельефом и редкой сетью наблюдений. Методы построения климатических карт с учетом факторов подстилающей поверхности активно разрабатываются в мире с 90-х гг. XX в., когда внедрение ГИС-технологий позволило автоматизировать подобные вычисления. Обзор первых работ в данном направлении приведен в статье (Ninyerola et al., 2000). Наиболее часто при интерполяции климатических данных учитывается зависимость от высоты местности. В ряде публикаций рассматриваются и другие факторы, такие как влияние крупных водоемов или распределение типов землепользования.

В России из работ в данном направлении стоит выделить создание электронного Агроэкологического атласа России и сопредельных стран (Афонин и др., 2008). Климатические карты в данном атласе представлены в цифровом виде с пространственным разрешением, равным 10 км. Карты были построены с применением современной методики, основанной на использовании множественной линейной регрессии для учета влияния рельефа, расстояния до береговой линии и других факторов. Однако эти карты были созданы на основе климатических норм середины XX в., и уже не отражают современные климатические условия.

В последние годы выросла доступность цифровых данных о свойствах подстилающей поверхно-

сти (рельефе, типах землепользования, температуре поверхности суши и океана и др.). Также появились в открытом доступе климатические данные с множества метеостанций, которые ранее были закрыты. Все это позволило в 2017 г. группе исследователей из университета Калифорнии (США) создать первый сеточный набор климатических данных с высоким пространственным разрешением (30 угловых секунд, что соответствует примерно 1 км) и глобальным охватом – WorldClim 2.0 (<http://worldclim.org/version2>). В отличие от данных реанализов (CFS, ERA-40, ERA-Interim и др.), данные WorldClim 2.0 созданы на основе интерполяции наблюдений метеостанций и более точно воспроизводят приземные климатические характеристики.

Набор данных WorldClim 2.0 включает семь основных переменных: среднесуточная, максимальная и минимальная температура воздуха, количество осадков, солнечная радиация, скорость ветра и парциальное давление водяного пара. Среднемесячные значения указанных переменных рассчитаны за период с 1971 по 2000 г. Для расчета различных переменных использовались данные от 9000 до 60000 метеостанций по всему Земному шару. Данные предоставляются в формате GeoTiff, в системе координат WGS-1984 с пространственным разрешением от 30" до 10'. Детальное описание данных WorldClim 2.0 и алгоритмов интерполяции, использованных для их создания, приведено в статье (Fick and Hijmans, 2017).

Пространственное разрешение данных WorldClim 2.0 многократно выше, чем характерное расстояние между метеостанциями. Для достижения такой детальности и сохранения необходимой точности, при интерполяции авторы учитывали высотные зависимости и расстояние до береговой линии (для прибрежных районов). Помимо этого, впервые в практике подобных исследований были использованы многолетние измерения температуры земной поверхности со спутников Terra/Aqua MODIS. Это позволило воспроизвести особенности пространственного распределения температуры воздуха в зависимости от комплекса свойств подстилающей поверхности (а не только высоты местности). Результаты валидации данных WorldClim 2.0 показали их высокую точность. Коэффициент корреляции между фактическими измерениями метеостанций и данными WorldClim 2.0 составляет более 0,99 для температуры воздуха, 0,86 для влажности и 0,76 для скорости ветра (Fick and Hijmans, 2017).

Учитывая высокую детальность данных WorldClim 2.0, их использование для построения карт биоклиматических параметров на территорию отдельных регионов представляется вполне перспек-

тивным. Однако предварительно необходимо провести их верификацию по данным местной наблюдательной сети, поскольку характеристики точности данных для изучаемого региона могут существенно отличаться от средних значений, приведенных в статье (Fick et al., 2017).

Исходными данными для расчета биоклиматических параметров является температура воздуха, относительная влажность воздуха и скорость ветра, поскольку именно их сочетание определяет теплоощущение человека. Следовательно, для расчета биоклиматических параметров были получены данные о среднесуточной температуре воздуха, парциальном давлении водяного пара и скорости ветра за январь, июль, апрель и октябрь с пространственным разрешением 30". Предварительная обработка полученных растров включала их проецирование и извлечение по границам изучаемого региона.

Относительная влажность воздуха была рассчитана по данным о температуре воздуха и парциальном давлении водяного пара. Также в данных WorldClim 2.0 слабо учитывается зависимость скорости ветра от высоты местности. В то же время, из ряда публикаций известно, что такая зависимость существует и может быть выражена формулой вида:

$$V_1 = V_0(H_1/H_0)k, \quad (1)$$

где H_1 – фактическая высота местности, H_0 – высота ближайшей метеостанции, V_0 – скорость ветра на метеостанции.

Безразмерный параметр k часто принимают равным 0,2 (Рыхлов, 2011). Это же значение параметра k использовалось и в настоящей работе. Расчет производился на основе цифровой модели рельефа средствами растровой алгебры. Само соотношение H_1/H_0 вычислялось путем деления раstra цифровой модели рельефа (ЦМР) на растр, полученный в результате интерполяции высот метеостанций.

Верификация данных WorldClim 2.0 выполнена путем их сравнения со среднемесячными значениями соответствующих величин по данным метеостанций Уральского УГМС. Данные WorldClim 2.0 о температуре воздуха и влажности были сопоставлены с климатическими нормами (за период 1971–2000 г.) по наблюдениям 29 и 23 метеостанций соответственно.

Верификация данных о скорости ветра аналогичным способом была невозможна, поскольку соответствующая информация о средней скорости ветра в открытом доступе имеется только для трех метеостанций. Поэтому сравнение было проведено с данными о средней скорости ветра за другой период (2005–2017 гг.). Данные с 19 метеостанций были получены из архива фактической погоды <https://rp5>.

гу/. Для каждой из переменных рассчитаны средняя и среднеквадратичная ошибки. Также вычислен коэффициент линейной корреляции Пирсона между фактическими данными метеостанций и данными WorldClim 2.0 (табл. 1).

Как следует из табл. 1, максимальную точность имеют данные WorldClim 2.0 по среднемесячной температуре воздуха. Систематические расхождения практически отсутствуют, так как значение средней ошибки для указанных месяцев не превышает 0,2 по модулю. Среднеквадратичная ошибка оказалась несколько выше, так как для отдельных метеостанций (например Кунгур, Лысьва) расхождения средней температуры по фактическим данным и по данным WorldClim 2.0 достигают двух градусов. Причем расхождения в холодный период существенно больше, чем в летний период. Это может быть связано с влиянием использованием температуры земной поверхности по спутниковым измерениям при интерполяции в проекте WorldClim 2.0.

Точность данных WorldClim 2.0 о влажности воздуха (парциальном давлении водяного пара) также является удовлетворительной. В отличие от температуры, в этих данных имеются систематические ошибки, а именно занижение значений влажности, более существенное для холодного периода. Однако сравнение величины этого занижения с фактическим средним значением влажности показывает, что оно незначительно. В большинстве месяцев величина среднеквадратичной ошибки составляет не более 10 % от средней влажности по данным метеостанций. Коэффициент корреляции между фактическими данными и данными WorldClim 2.0 как для температуры, так и для влажности близок к единице.

Что касается среднемесячной скорости ветра, то сравнение с фактическими данными метеостанций показывает существенное систематическое завышение скорости ветра в данных WorldClim 2.0. Это завышение объясняется тем, что для анализа пришлось использовать разные временные отрезки (фактические данные получены за 2005–2017 гг., а данные WorldClim 2.0 характеризуют период 1971–2000 гг.). Скорость ветра за это время уменьшилась

во многих регионах России. Наиболее значимой причиной такого уменьшения считается увеличение защищенности метеорологических площадок вследствие роста деревьев и застройки окружающей территории (Мещерская и др., 2006; Журавлев, Задде, 2013). Таким образом, существенное занижение скорости ветра по данным WorldClim 2.0 не указывает на ошибки в данных.

Верификация данных WorldClim 2.0 в целом подтверждает их удовлетворительный уровень точности для территории Пермского края. Это в совокупности с высоким пространственным разрешением и удобством использования данных позволяет рассчитывать на их основе биоклиматические параметры.

На основе данных WorldClim 2.0 были рассчитаны следующие биоклиматические параметры.

1. Эквивалентно-эффективная температура (ЭЭТ). Данный параметр определяет теплоощущения человека с учетом влияния скорости ветра и влажности воздуха и определяется по формуле (Головина, Русанов, 1993):

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

t – температура воздуха, °C;

f – относительная влажность, %;

v – скорость ветра, м/с.

2. Нормальная эквивалентно-эффективная температура (НЭЭТ) – показатель тепловой чувствительности с учетом влияния ветра для одетого человека:

$$\text{НЭЭТ} = 0,8 \text{ ЭЭТ} + 7^\circ\text{C}, \quad (3)$$

3. Радиационно-эквивалентно-эффективная температура (РЭЭТ) – показатель, который учитывает теплоощущение человека от нагревания солнечной радиацией. В соответствии с рекомендациями Е.Г. Головиной и В.И. Русанова, РЭЭТ может быть рассчитана по формулам:

Таблица 1
Результаты верификации данных WorldClim 2.0

Переменная	Коэффициент линейной корреляции между фактическими данными и данными WorldClim 2.0	Средняя и среднеквадратичная ошибки по месяцам			
		I	IV	VII	X
Температура воздуха, °C	0,998	–0,1/0,8	0,1/0,5	0,1/0,3	–0,2/0,6
Парциальное давление водяного пара, гПа	0,997	–0,41/0,42	–0,18/0,22	–0,29/0,59	–0,68/0,73
Скорость ветра, м/с	0,582	0,8/0,9	0,3/0,5	0,4/0,6	0,7/0,8

$$РЭЭТ = НЭЭТ + 6,2^{\circ}C \quad (4)$$

4. Биологически активная температура (БАТ) – показатель, определяющий влияние радиации, отраженной поверхностью Земли на организм человека.

$$БАТ = 0,8НЭЭТ + 9^{\circ}C \quad (5)$$

Расчет показателей производился средствами растровой алгебры программного комплекса ArcGIS 10.4. Результаты пересчета поверхностей были сглажены с помощью инструмента фокальной стати-

стики. Таким образом, были получены следующие результаты:

1. Карты эффективно-эквивалентных температур по четырем центральным месяцам холодного (январь, октябрь) (рис. 1) и теплого (апрель, июль) сезонов.

2. Карты производных от ЭЭТ величин – нормальных эквивалентно-эффективных температур (НЭЭТ), радиационно-эквивалентно-эффективных температур (РЭЭТ), карты биологически-активных температур (БАТ) по четырем месяцам центральных сезонов.

Рис. 1. Картосхема распределения эффективно-эквивалентных температур холодного периода – января (а) и октября (б):
 1 – крупные города; 2 – изолинии равных значений ЭЭТ; 3 – границы субъектов
 (I – Республика Коми, II – Кировская область, III – Ханты-Мансийский АО,
 IV – Пермский край, V – Свердловская область, VI – Удмуртская республика,
 VII – Республика Татарстан, VIII – Республика Башкортостан, IX – Челябинская область)

Результаты и их обсуждение

Значения ЭЭТ в январе по территории Пермского края изменяются в пределах от -28° до -36° С. Отмечается некоторое понижение значения ЭЭТ с запада на восток, в меридиональном направлении. Понижение значений ЭЭТ с юга на север не носит строго зональный характер, так как существенное влияние оказывают особенности подстилающей поверхности. Например, на юго-востоке края ЭЭТ

в январе на 1–2 градуса ниже, чем в целом по южной части исследуемой территории. Это обусловлено застаиванием холодного воздуха в долинах рек Ире-ни и Сылвы и подтверждается также сравнительно высокой повторяемостью сильных морозов в данном районе (Пьянков и др., 2016). Более сложное распределение ЭЭТ наблюдается в восточной части Пермского края, что связано с пересеченностью рельефа.

Осенью выражено влияние крупных водохранилищ на распределение ЭЭТ, т.к. в этот период температура воды часто бывает выше температуры воздуха. В целом в октябре значения ЭЭТ снижаются в северном направлении.

Публикация результатов на картографическом веб-сервисе

Созданные карты опубликованы в Атласной информационной системе (АИС) «Опасные гидрометеорологические явления Уральского Прикамья» (<http://ais.maps.psu.ru>). Более подробно информационное наполнение и функциональные возможности данного картографического сервиса описаны в работах (Абдуллин, 2017; Пьянков и др., 2017;), а также в Руководстве пользователя АИС (<http://ais.maps.psu.ru/help/help.html>). В рамках данной работы в АИС были добавлены два новых раздела: «Климатические карты по данным WorldClim 2.0» и «Биоклиматиче-

ские карты». В первом разделе представлены данные WorldClim 2.0, послужившие основой для создания биоклиматических карт, а во втором – собственно карты биоклиматических переменных. Также пользователь имеет возможность сравнить климатические карты на основе WorldClim 2.0 с ранее опубликованными в АИС климатическими картами.

Таким образом, в результате проведенной работы впервые получены оценки биоклиматической комфортности территории Пермского края (с учетом температуры воздуха, влажности и скорости ветра) на основе современных и актуальных исходных данных, и с учетом влияния факторов подстилающей поверхности. Также полученные результаты опубликованы на общедоступном картографическом веб-сервисе.

Исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-45-590056-р-а

Список литературы

1. Афонин А.Н., Грин С.Л., Дзюбенко Н.И., Фролов А.Н. (ред.) Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения, 2008 г. [DVD-версия].
2. Головина Е.Г., Русанов В.И. Некоторые вопросы биометеорологии. Учебное пособие. СПб., изд. РГГМИ, 1993. 90 с.
3. Журавлев Г.Г., Задде Г.О. Оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 376. С. 175–181.
4. Мещерская А.В., Еремин В.В., Баранова А.А., Майстрова В.В. Изменение скорости ветра на севере России во второй половине XX века по приземным и аэрологическим данным // Метеорология и гидрология. 2006. № 3. С. 83–97.
5. Оборин М.С., Ермакова Л.Н., Черепанова Е.С. Биоклиматическая оценка территории Пермского края // География и регион: материалы междунар. науч.-практ. конф. (23–25 сентября 2015 г.): в 6 т. Т.IV: Гидрометеорология. Картография и геоинформатика. 2015. С. 26–31
6. Пьянков С.В., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Атлас опасных гидрометеорологических явлений Уральского Прикамья. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь. 2016. 116 с.
7. Пьянков С.В., Шихов А.Н., Абдуллин Р.К. Современные методы и технологии в тематическом атласном картографировании (на примере АИС «Опасные гидрометеорологические явления Уральского Прикамья» // Вопросы географии. 2017. Вып. 144. С. 208–226.
8. Рыхлов А.Б. Закономерности изменения скорости ветра с высотой в приземном слое атмосферы на юго-востоке ЕТР для решения задач ветроэнергетики // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 20. С. 89–99.
9. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology 2017. Vol. 37. PP. 4302–4315
10. Ninyerola M., Pons X., Roure J.M. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques // International Journal of Climatology. 2000. V. 20. PP. 1823–1841.

THE CREATION OF THE MAPS OF BIOCLIMATIC VARIABLES FOR THE ATLAS INFORMATION SYSTEM «HAZARDOUS HYDROMETEOROLOGICAL EVENTS OF THE URAL PRIKAM'E REGION»

E.S. Cherepanova, L.N. Ermakova, A.N. Shikhov

Perm State University, Perm

cherepanova_es@rambler.ru, lnermak@psu.ru, and3131@inbox.ru

Abstract Bioclimatic indices are integrated parameters, which characterized the coupling influence of some meteorological variables and used to estimate the thermal sensations of man. The previously published maps of bioclimatic indices do not correspond to current climatic conditions of the Perm Krai, and do not take into account the influence of the underlying surface. We applied WorldClim 2.0 gridded climatic dataset with 30 spatial resolution as input data to create the maps of bioclimatic indices for Perm Krai territory. Monthly gridded data of temperature, relative humidity and wind speed for 1971–2000 are used to calculate three bioclimatic indices, such as effective equivalent temperatures and derived parameters. Before calculating bioclimatic indices, we compared WorldClim 2.0 data with climatic data estimated by weather stations. The obtained results confirmed satisfactory accuracy of WorldClim 2.0 data for Perm Krai territory. The temperature dataset has a maximum level of accuracy with RMSE ranges from 0,3 to 0,8 °C for different months. The humidity and wind speed datasets are somewhat less accurate.

The created bioclimatic maps characterized the main features of the spatial distribution of bioclimatic indices in the Perm Krai territory, taking into consideration the influence of underlying surface. The new maps of bioclimatic variables are published on the free-available web map service «Atlas information system of hazardous hydro-meteorological events of the Ural Prikam'e region».

Key words: bioclimatic indices, effective equivalent temperatures, climate maps, WorldClim 2.0 data, atlas information system

References

1. Afonin A.N., Grin S.L., Dzyubenko N.I., Frolov A.N. (eds.), 2008. Agroekologicheskiy atlas Rossii i sopredel'nykh stran: ekonomicheski znachimye rasteniya, ikh vrediteli, bolezni i sornye rasteniya, DVD-versiya. [Agroecological Atlas of Russia and adjacent countries: economically significant plants, their pests, diseases and weeds. DVD-version] (in Russian).
2. Golovina E.G., Rusanov V.I. 1993. Nekotorye voprosy biometeorologii. Uchebnoe posobie [Some issues of biometeorology. Tutorial]. St. Petersburg., RGGMI publisher, 90 p.
3. Zhuravlev G.G., Zadde G.O. 2013. Otsenka vetroenergeticheskogo potentsiala Kemerovskoy oblasti [Assessment of the wind energy potential of the Kemerovo Region]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Vol. 376. pp. 175–181.
4. Meshcherskaya A.V., Eremin V.V., Baranova A.A., Maystrova V.V. 2006. Izmenenie skorosti vetra na severe Rossii vo vtoroy polovine XX veka po prizemnym i aerologicheskim dannym [Change in wind speed in the north of Russia in the second half of the twentieth century on surface and upper-air data]. Meteorologiya i gidrologiya. Vol. 3. pp. 83–97.
5. Oborin M.S., Ermakova L.N., Cherepanova E.S. 2015. Bioklimaticheskaya otsenka territorii Permskogo kraja [Bioclimatic assessment of the Perm Krai territory]. Geografiya i region: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Vol. IV: Gidrometeorologiya. Kartografiya i geoinformatika [Geography and Region. Proceeding of the International scientific and practical conference. Vol. IV. Hydrometeorology. Cartography and geo-informatics] pp. 26–31.
6. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Abdullin R.K. 2016. Atlas opasnykh gidrometeorologicheskikh yavleniy Ural'skogo Prikam'ya. [Atlas of hazardous hydrometeorological phenomena of the Urals Prikam'e region]. Perm. Perm State University Publisher. 116 p.
7. Pyankov S.V., Shikhov A.N., Abdullin R.K. 2016. Sovremennye metody i tekhnologii v tematicheskoy atlasnoy kartografirovani (na primere AIS «Opasnye gidrometeorologicheskie yavleniya Ural'skogo Prikam'ya»). [The modern methods and technologies in the thematic atlas mapping (on the example of the AIS “Hazardous hydrometeorological phenomena of the Perm Krai”). Voprosy geografii. 2017. Vol. 144. pp. 208–226.
8. Rykhlov A.B. Zakonomernosti izmeneniya skorosti vetra s vysotoy v prizemnom sloe atmosfery na yugo-vostoke ETR dlya resheniya zadach vetroenergetiki. [Regularities in the variation of wind speed with altitude in the boundary layer of the atmosphere in the southeast of the European Russia for solving wind energy problems]. Uchenye zapiski RGGMU. 2011. Vol. 20. pp. 89–99.
9. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology 2017. Vol. 37. PP. 4302–4315
10. Ninzerola M., Pons X., Roure J.M. A methodological approach of climatological modelling of air temperature and precipitation through GIS techniques // International Journal of Climatology. 2000. V. 20. PP. 1823–1841.