

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ**  
**CLIMATIC RESOURCES**  
**КЛІМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ**

УДК 551.586

**В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков**

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: ecology@basnet.by*

**ОЦЕНКА БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА БЕЛАРУСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Рассмотрена возможность получения значений биоклиматического потенциала (БКП) крупного территориального масштаба на основе данных дистанционного зондирования и наземных наблюдений. Для ее решения было предложено два способа: первый основан на использовании данных глобальной системы реанализа ERA-Interim, а второй – на регрессионных зависимостях между БКП, гидротермического коэффициента по Г.Т. Селянинову (ГТК) и вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Оба предложенных способа были реализованы с помощью средств языка программирования Python. Анализ полученных результатов показал, что использование данных реанализа позволяет достаточно точно воспроизвести особенности пространственно-временной изменчивости БКП, но абсолютные значения БКП величины оказываются занижены. В то же время использование регрессионных зависимостей позволяет получить значения БКП, сопоставимые со значениями, вычисленными по данным наблюдений на станциях. Однако пространственное распределение значений БКП при этом имеет ряд особенностей, которые состоят в отсутствии широтной зональности и тесной связи с типом растительного покрова.

**Ключевые слова:** биоклиматический потенциал, компьютерная модель, растительность, изменения климата

**V.F. Loginov, M.A. Khitrykau**

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, e-mail: ecology@basnet.by*

**ESTIMATION OF BIOCLIMATIC POTENTIAL OF BELARUS USING REMOTE SENSING DATA AND COMPUTER  
MODELLING**

Possibility of large-scale bioclimatic potential values (BCP) computation on the base of remote sensing data and surface-level observations was considered in this work. In order to solve this problem, two methods were proposed: first method is based on using of ERA-Interim global reanalysis system data, second method is based on regression dependence between BCP, Selyaninov's hydrothermic coefficient (HTC) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Both methods were realized in Python programming language environment. Analysis of the results obtained showed that method based on reanalysis data allows reflect spatiotemporal changes of BCP with sufficient accuracy, but absolute values of BCP according to this method are always lower than actual. At the same time, BCP values calculated according to the second proposed method are very close to values obtained using observation data. The BCP values set, calculated according to the second method, have distinctive traits of spatial distribution: absence of latitudinal zonality and high dependence on vegetation type.

**Keywords:** bioclimatic potential, computer model, vegetation, climate change

**У. Ф. Логінаў, М. А. Хітрыкаў**

*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь, e-mail: ecology@basnet.by*

**АЦЭНКА БІЯКЛІМАТЫЧНАГА ПАТЭНЦЫЯЛУ БЕЛАРУСІ З ВЫКАРЫСТАННЕМ ДАДЗЕННЫХ ДЫСТАНЦЫЙНАГА  
ЗАНДЗІРАВАННЯ І КАМП'ЮТАРНАГА МАДЭЛЯВАННЯ**

У дадзенай рабоце разгледжана магчымасць атрымання значэнняў біякліматэчнага патэнцыялу (БКП) буйнога тэрытарыяльнага маштабу на аснове дадзеных дыстанцыйнага зандзіравання і наземных назіранняў. Для яе вырашэння былі прапанаваны два спосабы: першы заснаваны на выкарыстанні дадзеных глабальнай сістэмы рэаналізу

ERA-Interim, а други – на рэгрэсійных залежнасцях паміж БКП, гідратэрмічным каэфіцыентам па Г.Т. Селянінаву (ГТК) і вегетацыйным індэксам NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Абодва прапанаваныя спосабы былі рэалізаваныя з дапамогай сродкаў мовы праграмавання Python. Аналіз атрыманых дадзеных паказаў, што выкарыстанне дадзеных рэаналіза дазваляе дастаткова дакладна перадаваць асаблівасці прасторава-часовай зменлівасці БКП, але абсалютныя значэнні БКП атрымліваюцца заніжанымі. У той жа час выкарыстанне рэгрэсійных залежнасцей дазваляе атрымліваць значэнні БКП, супараўнальныя з атрыманымі па дадзеных назіранняў на станцыях. Аднак прасторавае размеркаванне значэнняў БКП мае шэраг асаблівасцей, якія складаюцца ў адсутнасці шыротнай занаўнасці і цеснай сувязі з тыпам расліннага покрыва.

**Ключавыя словы:** біакліматычны патэнцыял, камп'ютарная мадэль, расліннасць, змены клімату

**Введение.** Предложенный Д.И. Шашко показатель биоклиматического потенциала (БКП) [1, 2] является одним из наиболее удобных подходов комплексной оценки основных агроклиматических ресурсов, необходимых для роста и развития растений. Однако этот показатель фактически характеризует условия лишь для относительно небольших территорий вокруг метеорологических станций, тогда как получение значений БКП для отдельных хозяйств или районов по всей территории страны более существенно для практического применения, но оно требует других подходов в силу недостаточной плотности сети наблюдений. Решить эту проблему возможно, используя средства компьютерного моделирования и обработки данных, а также данных дистанционного зондирования Земли.

В настоящей работе предложено два подхода, позволяющих получить значения БКП для территорий, расположенных на удалении от метеорологических станций. Первый подход основан на использовании данных глобальных систем реанализа, второй – на использовании регрессионной зависимости значений БКП, вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и гидротермического коэффициента (ГТК) по Г.Т. Селянинову. В этом случае БКП рассматривается как предикат, а ГТК и NDVI как предикторы. Реализация данных подходов в виде простых компьютерных моделей позволит получать значения БКП с пространственным разрешением 3–5 км для всей территории Беларуси, что позволит оценить биоклиматический потенциал на уровне отдельных хозяйств.

**Материалы и методы.** Методика расчета биоклиматического потенциала (БКП) разрабатывалась Д.И. Шашко в 1960–1980-е годы [1, 2] для оценки обеспечения растений ресурсами тепла и влаги и проведения агроклиматического районирования территории бывшего СССР. БКП – это индекс, представляющий собой произведение двух коэффициентов роста, показывающих обеспеченность ресурсами тепла и влаги. Коэффициент обеспеченности ресурсами влаги ( $K_p$ ) рассчитывается по следующей эмпирико-статистической зависимости:

$$K_p = 1,5 \lg(20Md) - 0,21 + 0,63Md - Md^2.$$

Здесь  $Md$  – это показатель увлажнения, представляющий собой соотношение годовой суммы осадков ( $\Sigma P$ ) к годовой сумме среднесуточных значений дефицита влажности воздуха ( $\Sigma(E - e)$ ):

$$Md = \frac{\Sigma P}{\Sigma(E - e)}.$$

Коэффициент обеспеченности ресурсами тепла представляет собой соотношение суммы активных температур выше  $10^\circ\text{C}$  в рассматриваемом регионе или пункте наблюдения ( $\Sigma T_{>10^\circ\text{C}}$ ) к одной из базовых сумм температур ( $\Sigma T_{\text{баз}}$ ). Обычно в качестве базовой суммы температур принимают значения  $1000^\circ\text{C}$ , что соответствует среднему значению суммы активных температур выше  $10^\circ\text{C}$  на границе зоны земледелия на открытом грунте. Таким образом, итоговая формула расчета БКП имеет следующий вид:

$$\text{БКП} = K_p \frac{\Sigma T_{>10^\circ\text{C}}}{\Sigma T_{\text{баз}}}.$$

Однако для практического использования значения индекса БКП не очень удобны ввиду их относительно малой величины. Так, для территории Беларуси их значения варьируются в пределах 2–3 в зависимости от рассматриваемого периода и региона. Поэтому на практике чаще

всего используется показатель биологической продуктивности в баллах ( $B_k$ ). Он также был предложен Д. И. Шашко [1] и рассчитывается по формуле:

$$B_k = 100 \times K_p \frac{\sum T_{>10^\circ C}}{1900^\circ C}$$

Здесь  $1900^\circ C$  – средняя сумма активных температур для Нечерноземной зоны СССР.

**Значения  $B_k$  для метеостанций Беларуси, полученные Д. И. Шашко [1]**

Метеостанция	Значения $B_k$
Витебск	118
Борисов	122
Слуцк	127
Пружаны	132
Гомель	137

В рамках данной работы будет соблюдаться оригинальная методика Д. И. Шашко для расчета БКП. В работах [1, 2] автор проводил оценки биоклиматического потенциала на основе данных за период до 1970-х годов включительно, т.е. до начала современного потепления климата (таблица). Использование этого подхода позволит оценить масштаб изменений БКП за период современных изменений климата и провести сравнительную оценку изменений БКП за последние 60 лет.

Для реализации первого предложенного подхода по оценке БКП территории Беларуси были использованы данные глобальной системы реанализа ERA-Interim [3] с пространственным разрешением  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  за период с 1979 по 2016 г. Причины выбора подобного периода заключаются в необходимости обеспечить сравнимость результатов предыдущего анализа изменений БКП территории Беларуси [4–6], а также доступности необходимой метеорологической информации только за период с 1979 г. Как и в предыдущих работах [4, 5], были рассмотрены отдельные подпериоды: период современного потепления климата (1989–2016 гг.); период, предшествовавший началу современного потепления климата (1979–1988 гг.); 1-я фаза периода современного потепления климата (1989–2000 гг.); 2-я фаза периода современного потепления климата (2001–2016 гг.). Выбранная для анализа территория находится в границах  $50^\circ$ – $58^\circ$  с. ш. и  $20^\circ$ – $35^\circ$  в. д. Это позволяет оценить БКП территории Беларуси и смежных территорий соседних стран. Для упрощения и ускорения расчетов были использованы месячные данные. В связи с этим в расчетных формулах здесь вместо суммы активных температур выше  $10^\circ C$  используются значения сумм температур за период с мая по сентябрь ( $\sum T_{5-9}$ ).

Система реанализа ERA-Interim, как и другие подобные системы и модели, не предоставляет необходимые для расчета БКП значения дефицита влажности воздуха. Для их расчета использовалась методика ВМО [7], позволяющая получить значения дефицита влажности воздуха, если известны значения температуры, давления и относительной влажности. По формуле

$$E_w = 6,112 \exp \frac{17,62t}{243,12 + t}$$

рассчитываются значения насыщенного давления чистой фазы водяного пара ( $E_w$ );  $t$  – значения температуры,  $^\circ C$ . Значения парциального давления насыщенного пара во влажном воздухе ( $E$ ) можно найти по формуле:

$$E = f(p)E_w,$$

где  $f(p)$  – функция давления ( $p$ ) вида:

$$f(p) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-6}p - 0,074p^{-1}.$$

Далее, зная значения парциального давления насыщенного пара ( $E$ ) и относительной влажности ( $f$ ), можно получить значение фактического парциального давления водяного пара ( $e$ ):

$$e = \frac{fE}{100}.$$

Исходя из этого, можно вычислить значения дефицита влажности воздуха ( $D$ ):

$$D = E - e.$$

Пространственное разрешение исходных данных довольно грубое, поэтому для того чтобы получить значения БКП для отдельных хозяйств, данные были интерполированы с шагом  $0,05^\circ \times 0,05^\circ$  с помощью метода билинейной интерполяции.

Индексы ГТК и NDVI, являющиеся основой второго предложенного подхода, представляют собой следующее. ГТК – показатель влагообеспеченности, рассчитываемый по формуле:

$$\text{ГТК} = \frac{10R}{\sum T_{>10^\circ\text{C}}},$$

где  $\sum T_{>10^\circ\text{C}}$  – сумма активных температур выше  $10^\circ\text{C}$ , а  $R$  – количество осадков за период со средними температурами выше  $10^\circ\text{C}$ . Значение ГТК = 1 соответствует границе между зонами недостаточного и избыточного увлажнения. Средние значения ГТК для Беларуси составляют 1,1–1,4. Индекс NDVI является показателем радиационного типа теплообмена и климатического опустынивания. Он рассчитывается по формуле:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}},$$

здесь *NIR* и *Red* – спектральные отражательные способности подстилающей поверхности в ближнем инфракрасном и красном диапазонах соответственно. Этот индекс принимает значения от 0 до 1. Он имеет высокую корреляцию с количеством зеленой фитомассы и ее продукцией, что позволяет использовать его для оценки состояния сельскохозяйственных культур и растительного покрова в целом. Для территории Беларуси его средние значения находятся в пределах 0,6–0,75, однако они могут меняться в широких пределах на относительно небольшой территории в силу зависимости от ряда физико-географических и антропогенных факторов. Как правило, для территорий с высоким биоразнообразием (лесные и иные необрабатываемые земли) характерны наибольшие значения NDVI и темпы его прироста. Обрабатываемые земли относятся к территориям с пониженным биоразнообразием, поэтому значения NDVI и темпы его прироста ниже средних.

Второй подход основывается на использовании уравнений линейной регрессии. Коэффициенты корреляции линейной (одномерной полиномиальной), а также двух- и трехмерных полиномиальных регрессий БКП, ГТК и NDVI отличаются незначительно, поэтому для упрощения и ускорения расчетов на ЭВМ были использованы уравнения линейной регрессии. Кроме того, коэффициент корреляции между ГТК и NDVI составляет всего 0,15, поэтому ГТК и NDVI могут рассматриваться как независимые переменные в уравнении множественной регрессии. Данный подход был реализован двумя вариантами. Первый основан на использовании уравнений множественной регрессии между упомянутыми характеристиками, второй – на вычислении среднего из значений БКП, полученных на основе уравнений линейной регрессии БКП и ГТК, а также БКП и NDVI.

Применяемые в данной работе значения NDVI получены на основе спутниковых измерений системы MODIS [8]; мы использовали доступный ряд измерений за 2000–2016 гг. Это значит, что в рамках данного анализа рассмотрена лишь 2-я фаза периода современного потепления климата (2001–2016 гг.). Значения ГТК получены на основании сеточного архива метеорологических данных, разработанного в Институте природопользования НАН Беларуси [9]. Поскольку в архиве приведены только среднемесячные значения, ГТК рассчитывался на основании среднемесячных данных за период с мая по сентябрь. Пространственное разрешение полученных значений БКП составляет  $3,4 \times 5,7$  км.

Регрессионные зависимости рассчитывали на основе значений БКП, ГТК и NDVI, полученных для отдельных метеорологических станций Беларуси. Для определения зависимостей использовали станции, расположенные в населенных пунктах, где эффект городских островов тепла минимален (т.е. с населением не более 50 тыс. человек). Кроме того, были исключены станции Мстиславль (из-за непродолжительного ряда наблюдений), Нарочь, Чечерск, Любань, Щучин и Дрогичин (пропуск в рядах данных), а также станция Полесская и Березинский заповедник (из-за охлаждающего эффекта болот) – в этих районах значения БКП были занижены.

Множественная регрессионная зависимость между БКП, ГТК и NDVI имеет вид

$$\text{БКП} = 113,2265 + 40,9836\text{ГТК} + 30,8678\text{NDVI}.$$

Отдельные линейные зависимости между БКП, ГТК и NDVI следующие:

$$\text{БКП} = 134,2849 + 41,50979\text{ГТК},$$

$$\text{БКП} = 169,3693 + 15,81856\text{NDVI}.$$

Коэффициент множественной корреляции БКП, ГТК и NDV полученных уравнений регрессии составляет 0,57, а парные коэффициенты корреляции между ГТК и БКП и между NDVI и БКП соответственно 0,53 и 0,33. Статистическая значимость находится на уровне 90 % для первых двух случаев, что позволяет использовать эти зависимости для оценок БКП на экспериментальном уровне.

Данные подходы реализованы в виде скриптов в среде языка программирования Python [10]. При написании программного кода использовали библиотеки NumPy, Matplotlib, Basemap, NetCDF4 и Pandas [11–15].

**Результаты исследований.** Результаты анализа биоклиматического потенциала территории Беларуси представлены на рис. 1–7. На рис. 1–5 приведены карты распределения значений  $B_k$ , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, а на рис. 6–7 – карты, полученные на основании регрессионных зависимостей между БКП, ГТК по Г.Т. Селянинову и NDVI.

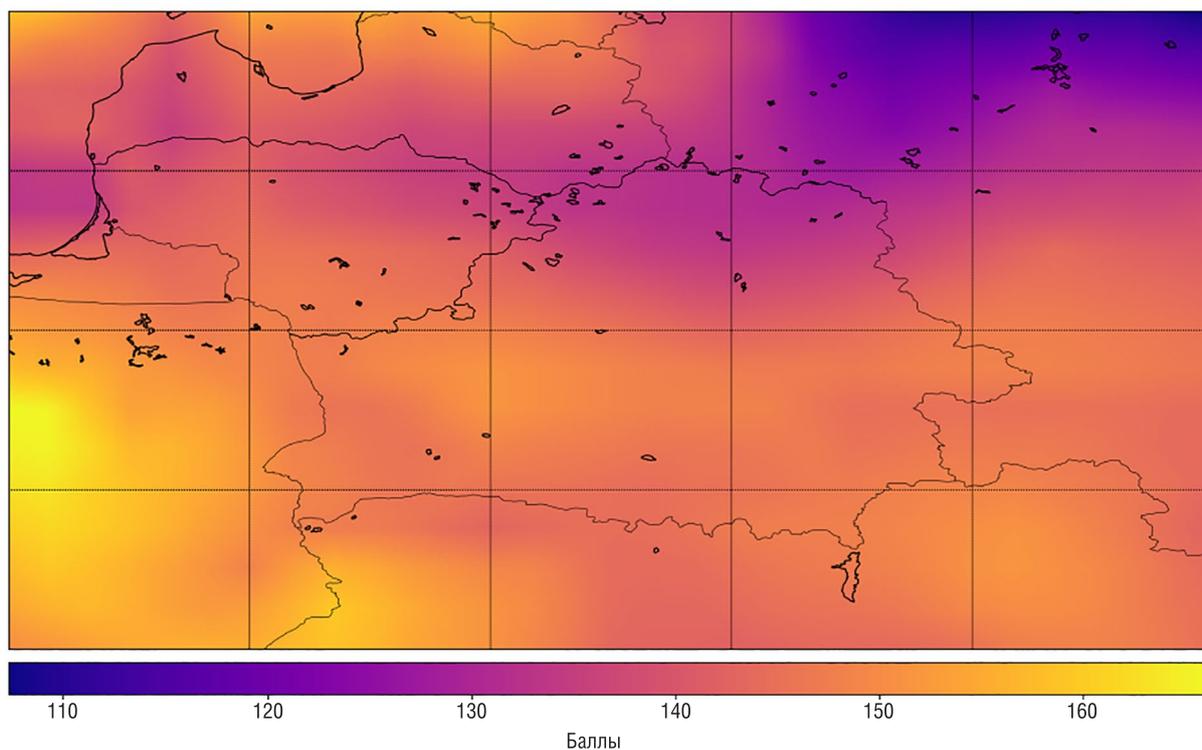


Рис. 1. Значения  $B_k$ , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за весь рассматриваемый период (1979–2016 гг.)

Генеральные особенности пространственного распределения значений  $B_k$  за весь рассматриваемый период (рис. 1) аналогичны тем, что были установлены в рамках предыдущих работ [4, 5]. Прослеживается широтная зональность распределения значений  $B_k$ , локальные аномалии  $B_k$  обусловлены местными особенностями распределения температуры и в большей мере количеством осадков. Однако есть и ключевые различия, состоящие в следующем. Значения  $B_k$ , полученные по данным системы реанализа, оказались существенно ниже значений, полученных по данным наблюдений на метеостанциях: величина разности составляет до 25–30

баллов, что делает их ближе к оценкам Д. И. Шашко. Значения  $B_k$ , полученные по данным реанализа, выше оценок Д. И. Шашко на 15–20 баллов. Поскольку данные реанализа получены в результате интерполяции, то локальные особенности распределения температуры и количества осадков сглаживаются. Например, на рис. 1 отсутствуют anomalно низкие значения для станции Полесская и anomalно высокие значения для станции Житковичи. Кроме того, интерполяция сглаживает эффект городских островов тепла, из-за которого на значительной части метеостанций Беларуси отмечается превышение значений  $B_k$  на 2–3 балла.

На рис. 1 прослеживается ряд крупномасштабных аномалий распределения  $B_k$ , которые ранее [5, 6] не отмечались: это минимум значений  $B_k$ , расположенный на Валдайской возвышенности и ее юго-западных окрестностях, а также максимумы значений  $B_k$ , расположенные в центральной Латвии, в центральной Польше и на северо-востоке Украины. Формирование минимумов значений  $B_k$  связано с недостатком тепловых ресурсов в указанном регионе, а формирование максимумов обусловлено высоким количеством осадков. Аномалии в распределении количества осадков также обусловили нарушение широтной зональности в южной части Беларуси: область максимальных значений  $B_k$  смещена на север и охватывает Предполесский регион.

Наиболее вероятная причина проявления подобных аномалий распределения значений  $B_k$  обусловлена характером использованных при расчете данных реанализа, являющихся результатом интерполяции. Кроме того, для расчетов значений  $B_k$  использовали данные не суточного, а месячного разрешения, что делает их недостаточно точными. Строго говоря, оценку тепловых ресурсов для расчета БКП более правильно проводить на основе данных суточного или хотя бы декадного разрешения.

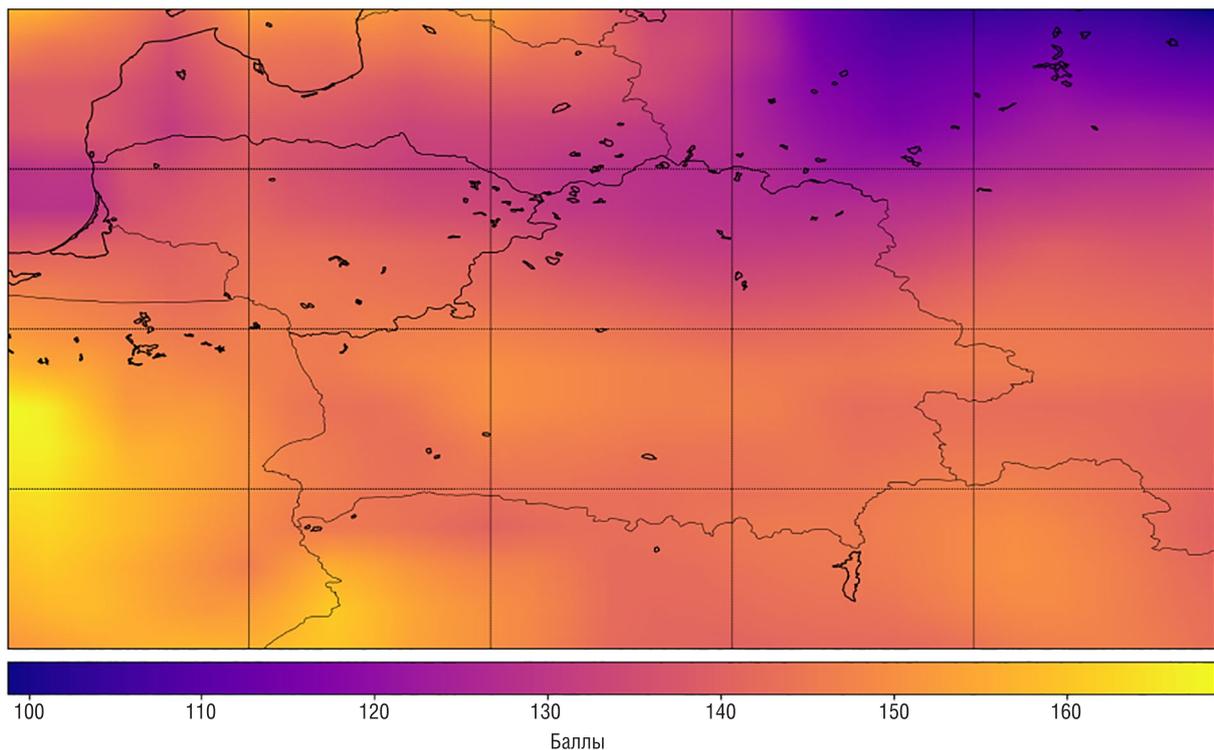


Рис. 2. Значения  $B_k$ , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за период современного потепления климата (1989–2016 гг.)

При сокращении рассматриваемого периода до эпохи современного потепления климата (1989–2016 гг.) характер пространственного распределения значений  $B_k$  по территории Беларуси и смежным территориям соседних стран не претерпевает существенных изменений (рис. 2). Однако необходимо отметить, что в отличие от результатов, полученных в работах [4, 5],

данные реанализа показали, что средние значения  $B_k$  за период современного потепления климата выше средних значений  $B_k$  за весь рассматриваемый период лишь на 2–3 балла. Другой важной особенностью стало усиление минимума значений  $B_k$ , охватывающего Валдайскую возвышенность и север Беларуси: значения  $B_k$  там не повышались, а в центральной части минимума даже снизились на 4–10 баллов. Это обусловлено тем, что на протяжении всего периода 1989–2016 гг. для данного региона было характерно снижение количества осадков на фоне незначительного прироста количества тепловых ресурсов или же его отсутствия.

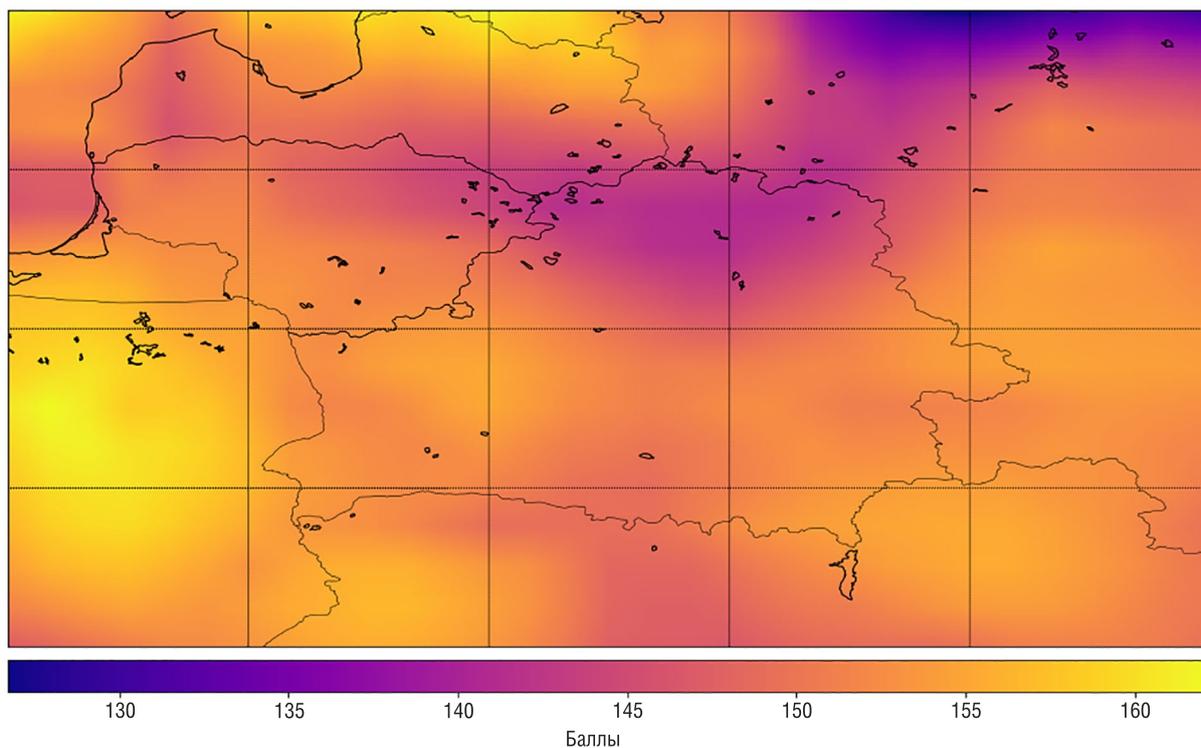


Рис. 3. Значения  $B_k$ , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за весь период, предшествовавший началу современного потепления климата (1979–1988 гг.)

Рассмотрим характер распределения значений  $B_k$  за период, предшествовавший началу современного потепления климата (1979–1988 гг.). Это самый короткий из рассматриваемых подпериодов, который, согласно данным HadCRUT4 [16], является, по своей сути, переходным периодом к современной эпохе потепления. Тем не менее период 1979–1988 гг. имеет ряд отличительных особенностей распределения значений  $B_k$ .

Как видно из рис. 3, ключевые особенности пространственного распределения значений  $B_k$ , отмеченные за весь рассматриваемый период (1979–2016 гг.), сформировались уже в 1979–1988 гг. Для большей части рассматриваемой территории период 1979–1988 гг. характеризовался минимальными значениями  $B_k$ . Отличительной чертой данного периода является меньшая контрастность климатических условий: разность между наибольшими и наименьшими значениями  $B_k$  по всей рассматриваемой территории составляет всего 35 баллов, в то время как для других периодов она варьируется от 55 до 80 баллов. Из-за этого большинство локальных максимумов и минимумов значений  $B_k$  здесь либо размыто, как в южной и центральной Беларуси, либо менее выражено, как на северо-востоке рассматриваемого региона.

Необходимо отметить, что период 1979–1988 гг. характеризуется минимальными расхождениями оценок  $B_k$  по данным метеостанций, полученным в работах [4, 5], по сравнению с оценками  $B_k$  других подпериодов. Это можно объяснить тем, что при современном потеплении климата акцентировалось влияние местных особенностей распределения температуры и количества осадков на значения  $B_k$  (в крупных городах это в первую очередь усиление островов тепла).

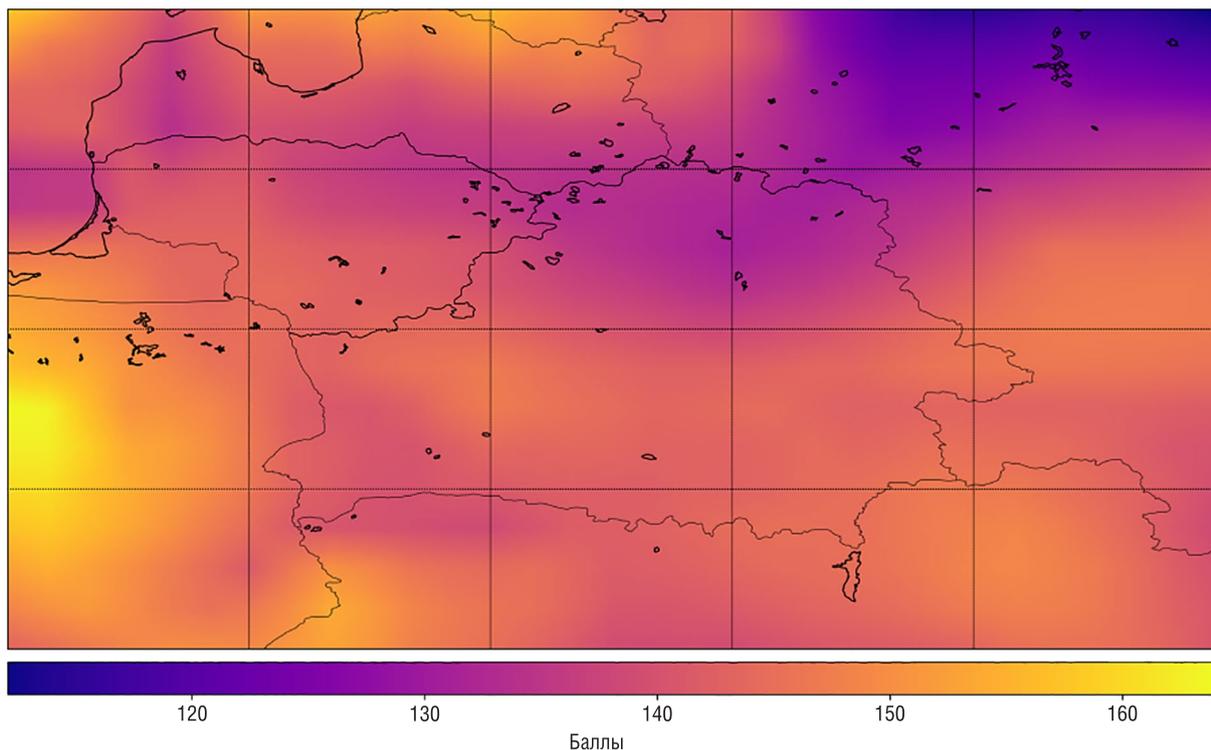


Рис. 4. Значения  $B_k$ , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за первую фазу периода современного потепления климата (1989–2000 гг.)

В течение первой фазы периода современного потепления климата (1989–2000 гг.) происходило усиление контрастности климатических условий, роль местных особенностей распределения температуры и количества осадков на величину  $B_k$  существенно увеличилась (рис. 4). Результатом этого стало усиление экстремумов значений  $B_k$ . Наиболее выразительно это усиление проявилось на северо-востоке (Валдайская возвышенность) и юго-западе (центральная Польша) рассматриваемого региона. Важной особенностью является слабый рост значений  $B_k$  в этот период (примерно 2–5 баллов), в том числе на территории Белорусского Полесья, где, согласно работам [4, 5], в 1989–2000 гг. отмечался наиболее значимый прирост значений  $B_k$ . Вероятнее всего, это является следствием сглаживания местных аномалий распределения температуры и количества осадков при интерполировании значений метеорологических параметров при использовании реанализа. На Валдайской возвышенности и прилегающих к ней территориях снижение  $B_k$  доходило до 10–12 баллов. Причины этого были указаны ранее.

Характер пространственного распределения значений  $B_k$  во время второй фазы периода современного потепления климата (2011–2016 гг.) был аналогичен таковому во время первой фазы потепления. Контрастность климатических условий стала еще выше, поэтому усиление экстремумов значений  $B_k$  продолжилось. Прирост значений  $B_k$  составил в среднем 10–15 баллов и был связан с увеличением теплообеспеченности, однако он был свойственен преимущественно территориям южнее  $54^\circ$  с. ш. Севернее  $54^\circ$  с. ш. прирост значений  $B_k$  был незначителен, иногда даже отмечалось его снижение (Валдайская возвышенность). Это связано со снижением количества осадков в данном регионе. Снижение значений  $B_k$  в лесостепной и степной зонах Украины, отмеченное в работе [5], здесь не прослеживается. В результате усиления контрастности в распределении значений  $B_k$  для периода 2001–2016 гг. были характерны наибольшие расхождения со значениями  $B_k$  по данным наблюдений на метеорологических станциях. На территории Беларуси наибольшие расхождения отмечались в северной части страны: согласно данным реанализа, рост значений  $B_k$  там был незначителен, в то время как, согласно данным работ [4, 5], наиболее интенсивный прирост значений  $B_k$  свойственен именно северной Беларуси.

В то же время несмотря на расхождения значений  $B_k$ , полученных разными способами, значения  $B_k$ , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim (рис. 5), достаточно точно воспроизвели ключевую особенность временных изменений  $B_k$ : прирост значений за 2001–2016 гг. относительно 1989–2000 гг. был заметно выше, чем прирост значений за 1989–2000 гг. относительно 1979–1988 гг. Это связано с тем, что для второй фазы периода современного потепления климата наиболее существенный прирост количества тепловых ресурсов наблюдался в летнее время.

Рассмотрим значения  $B_k$ , полученные на основе зависимостей между БКП, ГТК по Г. Т. Селянинову и вегетационным индексом NDVI.

Как видно из рис. 6, характер распределения значений  $B_k$ , полученный на основе регрессионных зависимостей между биоклиматическим потенциалом и индексам ГТК и NDVI, существенно отличается от характера распределения значений  $B_k$ , рассчитанных по методике Д. И. Шашко на основе данных метеорологических станций и данных реанализа. Пространственная структура этих значений  $B_k$  имеет иные генеральные особенности: в ней не прослеживается широтная зональность, а ее изменениям свойственен резкий и неоднородный характер.

Если сравнить распределение полученных значений  $B_k$  с распределением значений ГТК [17] и NDVI [8] по территории Беларуси, то можно выявить следующие особенности. Общие тенденции пространственного распределения значений  $B_k$ , полученные на основе регрессионной зависимости, «унаследовали» от распределения ГТК по территории Беларуси. Им свойственно уменьшение  $B_k$  при продвижении с северо-запада на юго-восток; область максимальных значений охватывает Новогрудскую и Ошмянскую возвышенности, а область минимальных значений – юго-восток Гомельской области. Изменения NDVI объясняют изменчивость значений  $B_k$  на локальном уровне. Наиболее важным фактором, определяющим величину NDVI, является соотношение площадей лесных и обрабатываемых земель: чем выше лесистость территории, тем выше будут значения NDVI. Характер растительного покрова также может резко меняться в зависимости от физико-географических факторов и это отображается в характере распределе-

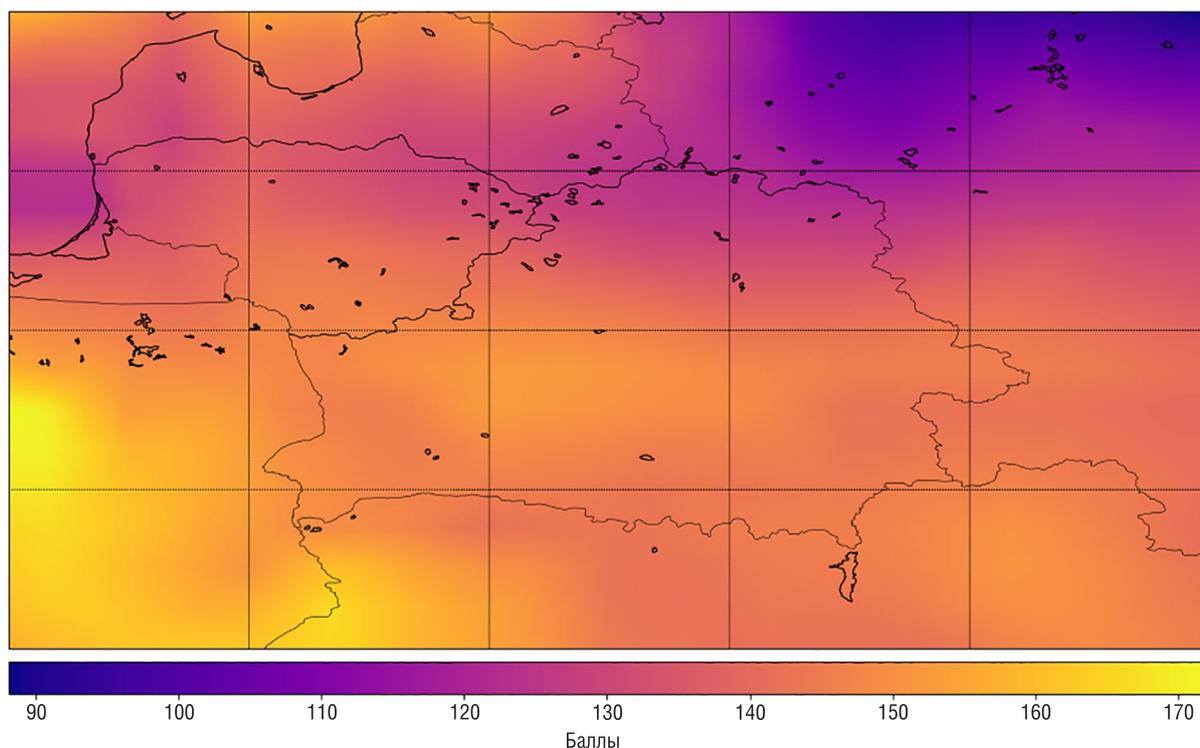


Рис. 5. Значения  $B_k$ , полученные по данным системы реанализа ERA-Interim, за вторую фазу периода современного потепления климата (2001–2016 гг.)

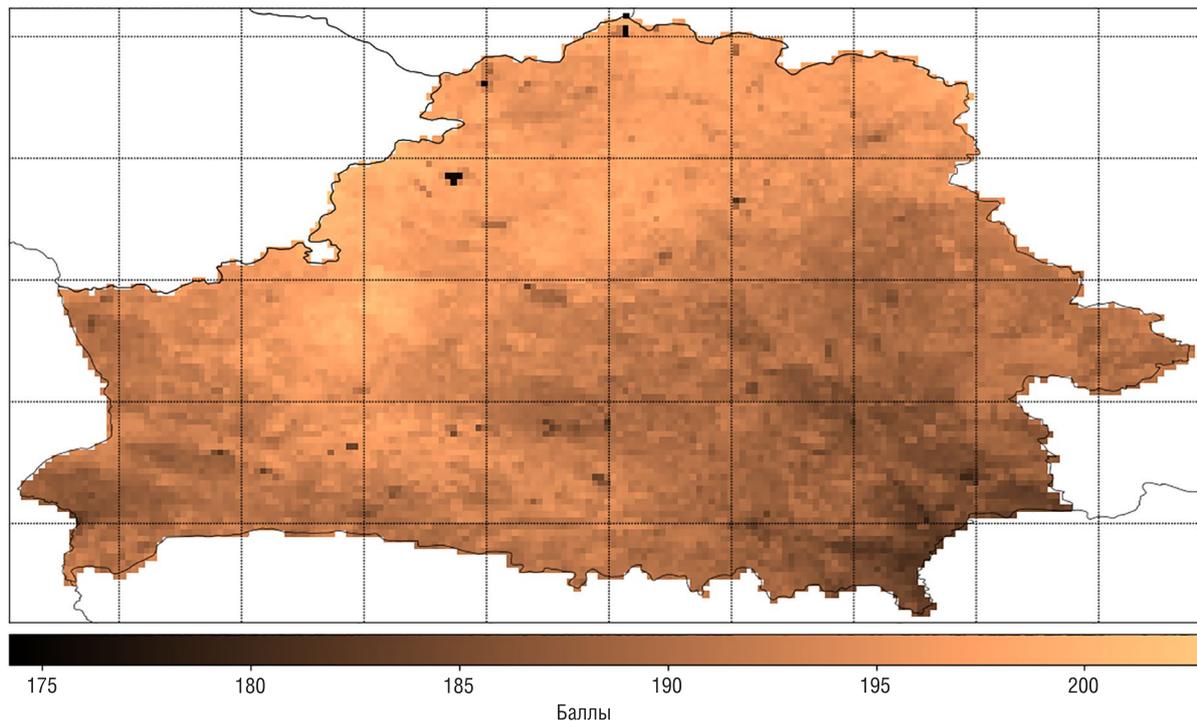


Рис. 6. Значения  $B_k$ , полученные с помощью уравнения множественной регрессии БКП, ГТК и NDVI за период 2001–2016 гг.

ния  $B_k$ . Так, на данной карте (рис. 6) можно выделить крупнейшие возвышенности Белорусской гряды (Минскую, Новогрудскую и Ошмянскую) и долины рек Днепра и Припяти на территории Гомельской области. Кроме того, на ней четко прослеживаются небольшие минимумы значений  $B_k$ , соответствующие крупнейшим городам Беларуси, что обусловлено пониженными значениями NDVI на урбанизированных территориях. Интересно также отметить, что на этой карте заметно выделяется зона радиоактивного загрязнения ЧАЭС, охватывающая юг Могилевской и северо-восток Гомельской области. Это связано с тем, что из-за вывода сельскохозяйственных земель из оборота существенно выросла лесистость и, как следствие, возросли средние значения NDVI и  $B_k$ .

Положительный эффект повышения температуры, количества осадков и концентрации углекислого газа в атмосфере для территорий с пониженным биоразнообразием (в том числе сельскохозяйственных земель) менее значителен, поэтому прирост значений NDVI там невелик. Таким образом, прирост значений  $B_k$  на сельскохозяйственных землях меньше, чем прирост значений  $B_k$  на лесных землях за аналогичный период времени.

Необходимо отметить следующую особенность. Величина NDVI существенно зависит от характера выпадающих осадков: если большая часть осадков имеет ливневой характер, то большая их часть будет уходить на поверхностный сток и в результате растения могут испытывать дефицит влаги, что приводит к снижению значений NDVI. Эта особенность может стать причиной серьезного снижения значений  $B_k$  по сравнению со значениями, рассчитанными непосредственно по методике Д.И. Шашко. Ярким примером является станция Брагин: значения  $B_k$  за 2001–2015 гг., рассчитанные по методике Д.И. Шашко, для этой станции сопоставимы со значениями  $B_k$  для станции Новогрудок, однако значения  $B_k$ , рассчитанные на основе регрессионной зависимости между БКП, ГТК и NDVI, для этой станции на ~25 баллов ниже, чем значения  $B_k$  для станции Новогрудок, рассчитанные по аналогичной методике. Это связано с тем, что на станции Брагин в 2001–2015 гг. существенно возросло количество осадков, однако они имели преимущественно ливневой характер [18], поэтому значения NDVI и, следовательно,  $B_k$  выросли незначительно.

Несмотря на существенную разницу в характере пространственного распределения, полученные значения баллов  $B_k$  близки к тем, что были рассчитаны на основе данных наблюдений на метеорологических станциях [4, 5]. В среднем значения  $B_k$ , полученные на основе регрессионной зависимости БКП, ГТК и NDVI, на 5–7 баллов выше значений  $B_k$ , полученных по данным наблюдений на метеостанциях (рис. 7).

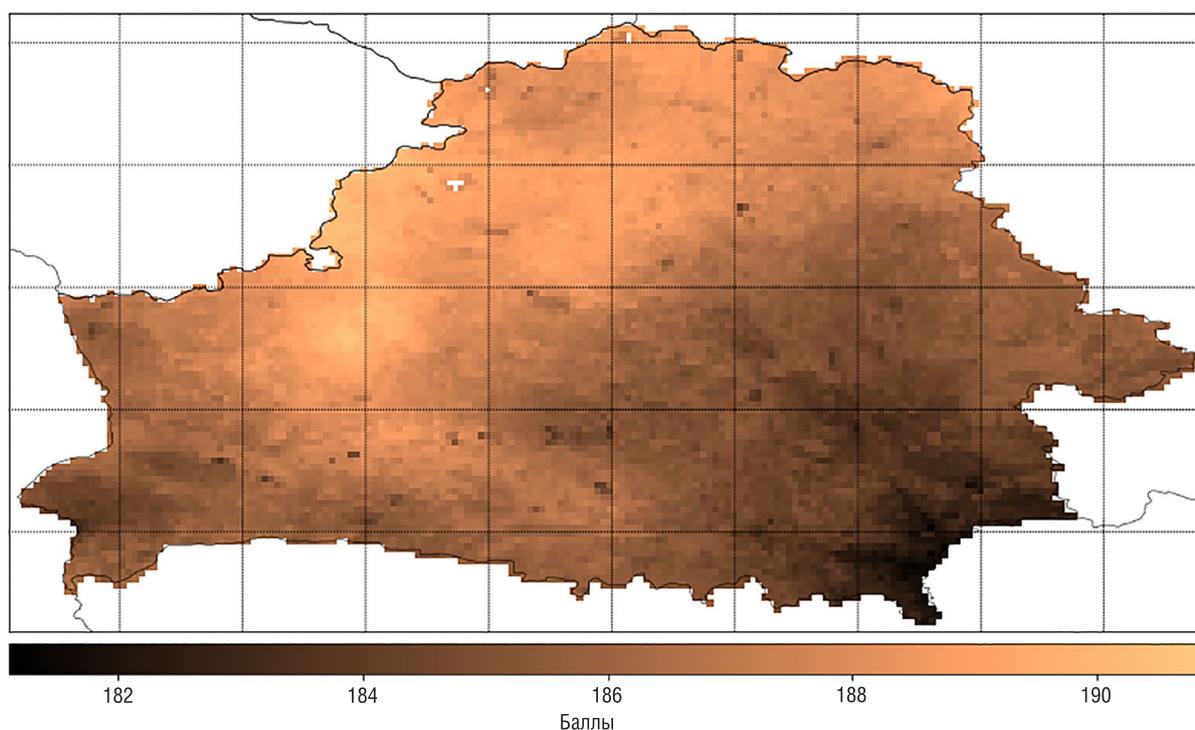


Рис. 7. Значения  $B_k$ , полученные на основании усредненных значений линейных регрессионных зависимостей между БКП и ГТК, а также БКП и NDVI за 2001–2016 гг.

Характер пространственного распределения значений  $B_k$ , полученных путем второй реализации, т. е. на основании усредненных линейных зависимостей между БКП и ГТК, а также БКП и NDVI, аналогичен распределению значений  $B_k$ , полученных на основании множественной регрессии между БКП, ГТК и NDVI (первой реализации). Единственное отличие заключается в том, что значения  $B_k$ , полученные с помощью данной реализации, испытывают меньшую пространственную изменчивость: разница между максимумом и минимумом составляет 10 баллов по сравнению с разницей в 25 для первой реализации, а также практически полностью совпадают со значениями, полученными на основе методики Д. И. Шашко [4, 5]. Таким образом, для практического применения вторая реализация, основанная на использовании усредненных значений линейных регрессионных зависимостей между БКП и ГТК, а также БКП и NDVI, будет наиболее оптимальна.

**Выводы.** Значения биоклиматического потенциала, выраженного в баллах биологической продуктивности ( $B_k$ ), полученные на основе данных глобальной системы реанализа ERA-Interim, с достаточной точностью воспроизвели определенные ранее [4, 5] ключевые особенности пространственного распределения ее средней величины и временной изменчивости на большей части рассматриваемой территории. Кроме того, значения  $B_k$ , полученные этим способом, не были искажены климатическим эффектом городов. Однако в то же время абсолютные значения  $B_k$ , полученные данным способом, существенно расходились со значениями, полученными по данным наблюдений на метеорологических станциях, и из-за разной скорости роста значений  $B_k$  в этих группах разность между ними увеличивалась на протяжении всего рассматриваемого периода. Значения  $B_k$ , полученные данным способом, более близки к оцен-

кам Д. И. Шашко [1]. Значения  $B_k$ , полученные на основе регрессионных зависимостей между БКП, ГТК по Г. Т. Селянинову и NDVI, сопоставимы со значениями  $B_k$ , полученными по данным наблюдений на станциях, однако их пространственное распределение было совершенно иным. Для значений  $B_k$ , полученных на основе регрессионных зависимостей между БКП, ГТК и NDVI, отмечаются иные генеральные особенности пространственного распределения, а его характер необычайно пестр. В нем прослеживаются особенности пространственного распределения ГТК и NDVI, параметров-предикторов регрессионной зависимости.

Таким образом, для практического использования при вычислении значений БКП крупного пространственного разрешения более целесообразно использовать второй подход, основанный на регрессионной зависимости между БКП, ГТК и NDVI. Введение вегетационного индекса NDVI в расчетную схему позволяет дать реальную комплексную оценку благоприятности климатических условий для роста и развития растений в целом.

### Список использованных источников

1. Шашко, Д. И. Агроклиматические ресурсы СССР / Д. И. Шашко. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 248 с.
2. Шашко, Д. И. Агроклиматическое районирование СССР / Д. И. Шашко. – М.: Колос, 1967. – 335 с.
3. ERA-Interim Global Reanalysis System [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>. Date of access: 09.04.2019.
4. Логинов В. Ф. Пространственно-временные изменения биоклиматического потенциала территории Беларуси / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков. // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2017. – № 1. – С. 42–57.
5. Хитриков, М. А. Характеристика изменений биоклиматического потенциала Беларуси и сопредельных территорий Литвы и Украины за период 1977–2015 гг. / М. А. Хитриков // Природопользование. – 2018. – № 1. – С. 135–149.
6. Логинов, В. Ф. Прогноз изменения биоклиматического потенциала территории Беларуси на период 2016–2035 гг. / В. Ф. Логинов, М. А. Хитриков. // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2018. – № 1. – С. 51–64.
7. World meteorological organization, Guide to meteorological instruments and methods of observations, 7th edition, Geneva, WMO, 2008, 716 p.
8. MODIS Vegetation Index Products (NDVI and EVI) [Electronic resource]. – Mode of access: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>. Date of access: 15.04.2019.
9. Лысенко С. А. Сеточный архив метеорологических данных для республики Беларусь и возможности его применения для исследования пространственно-временных особенностей изменений климата / С. А. Лысенко, В. Д. Чернышев, В. В. Коляда // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 17–27.
10. Python Programming Language [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.python.org>. Date of access: 05.03.2019.
11. NumPy package for scientific computing [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.numpy.org>. Date of access: 11.03.2019.
12. Matplotlib Python plotting library [Electronic resource]. – Mode of access: <https://matplotlib.org>. Date of access: 15.03.2019.
13. Matplotlib Basemap Toolkit [Electronic resource]. – Mode of access: <https://matplotlib.org/basemap/>. Date of access: 20.03.2019.
14. netCDF4 module for Python documentation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://unidata.github.io/netcdf4-python/netCDF4/index.html>. Date of access: 12.03.2019.
15. Pandas Data Analysis Library [Electronic resource]. – Mode of access: <https://pandas.pydata.org>. Date of access: 28.03.2019.
16. HadCRUT4 Global Temperature Dataset [Electronic resource]. – Mode of access: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>. Date of access: 30.04.2019.
17. Нацыянальны атлас Рэспублікі Беларусь / Белкартаграфія ; пад рэд М. У. Мясніковіча. – Мінск : Белкартаграфія, 2002. – 292 с.
18. Атлас опасных метеорологических явлений на территории Беларуси : учеб. пособие / В. Ф. Логинов [и др.]. – М.: Мещерский филиал ВНИИГМ им. А. Н. Костякова, 2018. – 58 с.

Поступила 02.07.2019