

ГЕОГРАФИЯ

GEOGRAPHY

УДК 551.586+551.588.6

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI

В. Ф. ЛОГИНОВ¹⁾, М. А. ХИТРИКОВ¹⁾

¹⁾Институт природопользования НАН Беларуси,
ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь

Проведен анализ связи изменений биоклиматического потенциала с изменениями состояния сельскохозяйственных культур. Использованы показатель биологической продуктивности по Шашко (B_k) и вегетационный индекс NDVI (*normalised difference vegetation index*). Для территории Беларуси свойственно повышение средних значений обоих параметров: с начала XXI в. прирост значений B_k составил 10–15 баллов, а прирост значений NDVI – 0,02–0,03 пункта. Характер связи между этими показателями зависит от типа растительного покрова. Для лесной растительности современные изменения климата оказались благоприятными, тогда как на обрабатываемых землях наблюдается снижение средних значений NDVI, несмотря на рост B_k . Главной причиной этого является высокая зависимость состояния сельскохозяйственных культур от общих ресурсов влаги (коэффициент корреляции r между значениями NDVI и количеством осадков составляет 0,65–0,80), которые, согласно данным измерений TWSA (*terrestrial water storage anomaly*), в последнее десятилетие начинают снижаться.

Ключевые слова: биоклиматический потенциал; биопродуктивность; изменения климата; вегетационный индекс NDVI; растительный покров.

Образец цитирования:

Логинов ВФ, Хитриков МА. Оценка изменений биоклиматического потенциала территории Беларуси с использованием вегетационного индекса NDVI. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2021;1:3–12.

<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-1-3-12>

For citation:

Loginov VF, Khitrykau MA. Estimation of changes in bioclimatic potential values on the territory of Belarus using normalised difference vegetation index (NDVI). *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2021;1:3–12. Russian.

<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2021-1-3-12>

Авторы:

Владимир Федорович Логинов – академик НАН Беларуси, доктор географических наук, профессор; главный научный сотрудник Центра климатических исследований.

Максим Александрович Хитриков – младший научный сотрудник Центра климатических исследований.

Authors:

Vladimir F. Loginov, academician of the National Academy of Sciences of Belarus, doctor of science (geography), full professor; chief researcher at the Centre for Climate Research.

Maxim A. Khitrykau, junior researcher at the Centre for Climate Research.

m.a.hitrykau@gmail.com





ESTIMATION OF CHANGES IN BIOCLIMATIC POTENTIAL VALUES ON THE TERRITORY OF BELARUS USING NORMALISED DIFFERENCE VEGETATION INDEX (NDVI)

V. F. LOGINOV^a, M. A. KHITRYKAU^a

^aInstitute for Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,

10 F. Skaryny Street, Minsk 220076, Belarus

Corresponding author: M. A. Khitrykau (m.a.hitrykau@gmail.com)

Relations between bioclimatic potential changes and changes in state of crops have been analysed. NDVI (normalised difference vegetation index) and biological productivity parameter by D. I. Shashko (B_k) were used for this purpose. Average values of both parameters have been increasing over the territory of Belarus: since the beginning of 21st century, B_k values increased by 10–15 points and NDVI values – by 0.02–0.03 points. Relations between them depend on the type of vegetation. Current climate changes appeared to be favourable for forests, but average NDVI values on the croplands have been decreasing despite B_k growth. The main reason for this is high correlation between state of vegetation and water resources available (correlation coefficient r between NDVI and precipitation is 0.65–0.80), which, according to TWSA (terrestrial water storage anomaly) measurements, have begun to decrease during the last decade.

Keywords: bioclimatic potential; bioproductivity; climate change; NDVI; vegetation.

Введение

В условиях современного потепления климата переоценка изменений агроклиматических условий и реакций сельскохозяйственных культур крайне необходима для обеспечения устойчивого функционирования и развития сельскохозяйственного производства. Наибольшее внимание при этом следует уделять изменениям тепло- и влагообеспеченности. Для общей оценки благоприятности агроклиматических условий целесообразно использовать интегральные индексные показатели. Среди них простым и достаточно полным является биоклиматический потенциал (БКП), вычисленный по методике Шашко [1]. Изначально разрабатывавшийся как основа для бонитировки климата и агроклиматического районирования, он очень удобен для сравнения степени благоприятности агроклиматических условий в различных регионах.

Климатические показатели дают представление о возможностях сельскохозяйственного производства и специализации растениеводства, однако только на их основе нельзя судить о реакции сельскохозяйственных культур на изменения климата. Для оценки состояния растений используются вегетационные индексы. Из них на практике наиболее широкое применение нашел индекс NDVI (*normalised difference vegetation index*), служащий характеристикой общего количества зеленой фитомассы и ее состояния. Главным фактором, определяющим его величину, является тип подстилающей поверхности, а изменения индекса позволяют судить о влиянии неблагоприятных погодных условий, нашествий вредителей и болезней, недостаточной обработке посевов. Важная особенность вегетационного индекса NDVI заключается в том, что его изменения становятся более заметными в условиях засушливого климата из-за тесной связи с характеристиками общей влагообеспеченности [2].

Оценку реакции сельскохозяйственных культур на изменения климата можно получить путем сопоставления изменений БКП, вычисленного по методике Шашко, и NDVI. Подобное сравнение оправдано, так как погодно-климатические условия являются главным фактором изменения величины NDVI на отдельных территориях в масштабе административных районов и областей. Оно позволит улучшить понимание того, какие особенности современного изменения климата наиболее значимы для сельскохозяйственных культур и какие меры необходимо применять для успешной адаптации растениеводства в Беларуси.

Известны три пути оценки влияния растительного покрова на климат: через изменения альbedo подстилающей поверхности, интенсивности эвапотранспирации, а также интенсивности фотосинтеза и дыхания [2]. Современные тенденции изменения количества фитомассы свидетельствуют об «озеленении» планеты в результате изменения природных и антропогенных факторов [3; 4]. Однако оно идет преимущественно за счет накопления фитомассы в умеренных широтах и ее сокращения в тропиках. В условиях Беларуси накопление фитомассы приводит к дополнительному отепляющему эффекту [2; 5]. Учитывая текущую тенденцию усиления засушливости климата, возникает необходимость в более глубоком изучении связи изменений растительного покрова и климата.



Материалы и методы исследования

Биоклиматический потенциал, вычисленный по методике Шашко [1], представляет собой произведение двух коэффициентов роста, термического и влажностного, выраженное в индексной форме. Влажностный коэффициент роста (K_p) рассчитывается на основании сложной эмпирической зависимости (основная – логарифмическая, вспомогательная – параболическая):

$$K_p = 1,5 \lg(20\text{КУ}) - 0,21 + 0,63\text{КУ} - \text{КУ}^2,$$

где КУ – коэффициент годового атмосферного увлажнения, выражаемый как отношение годового количества осадков (P) к годовой сумме значений дефицита влажности воздуха ($\sum D$), т. е.

$$\text{КУ} = \frac{P}{\sum D}.$$

На практике часто используется упрощенная формула расчета влажностного коэффициента роста вида $K_p = 1,5 \lg(20\text{КУ})$. Термический коэффициент роста (K_t) представляет собой соотношение суммы активных температур выше 10°C за год ($\sum T_{>10^\circ\text{C}}$) и базовой суммы температур ($\sum T_{баз}$). В качестве базовой суммы температур преимущественно используется значение 1000°C , соответствующее сумме активных температур выше 10°C на северной границе зоны земледелия в открытом грунте. Таким образом, итоговая формула расчета БКП имеет вид

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

Для проведения сравнительной оценки и районирования в пределах какой-либо определенной территории применяется производный от БКП показатель биологической продуктивности (B_k) в баллах. От БКП он отличается тем, что в качестве базовой суммы температур используется значение 1900°C , соответствующее среднему значению для территории бывшего СССР, для которой Д. И. Шашко проводил бонитировку климата и агроклиматическое районирование. Кроме того, в целях получения более наглядного значения термический коэффициент роста умножается на 100. Таким образом, расчетная формула B_k имеет следующий вид:

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

Для расчета значений B_k использовались данные метеорологических наблюдений суточного разрешения за 2001–2015 гг. по всем станциям Беларуси, за исключением станций Нарочь, Мстиславль, Чечерск, Любань, Щучин, Колодищи и Дрогичин из-за малой продолжительности рядов наблюдений и (или) наличия больших пропусков в них. Период 2001–2015 гг. соответствует второй фазе современного изменения климата [6], когда потепление происходило преимущественно за счет повышения летних температур. Сравнительно небольшой по продолжительности период взят в связи с необходимостью обеспечить сопоставимость с рядами данных по NDVI.

Индекс NDVI – это относительная величина, представляющая собой отношение разности спектральных отражающих способностей земной поверхности в ближнем инфракрасном (NIR) и красном (Rd) диапазонах к их сумме:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rd}}{\text{NIR} + \text{Rd}}.$$

Значения данного индекса лежат в пределах от 0 до 1. Индекс NDVI является показателем радиационного типа теплообмена, однако благодаря высокой корреляции с количеством зеленой фитомассы он используется как показатель состояния растительного покрова. Недостаток этого параметра заключается в том, что он отражает общее количество и состояние фитомассы сельскохозяйственных культур, а не их урожайность. Опыт агрономической практики показывает, что большая биомасса не всегда соответствует высокой урожайности. Тем не менее для определения масштаба и характера влияния изменений климата на состояние посевов сельскохозяйственных культур его точности достаточно.



Источником данных по вегетационному индексу NDVI, использованных в настоящей работе, являются электронные архивы спутниковой системы MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)¹. Наборы значений NDVI, полученных по результатам ее измерений, размещаются в свободном доступе, обновляются дважды в месяц и имеют пространственное разрешение 1 км, что достаточно для оценки состояния культур на полях на территории отдельных хозяйств.

Оценка изменений общих водозапасов Беларуси была дана исходя из изменений показателя TWSA (*terrestrial water storage anomaly*), значения которого получены на основе измерений спутниковой системы GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*)². Определение количества влаги в этой системе базируется на измерении колебаний гравитационного поля Земли.

Результаты и их обсуждение

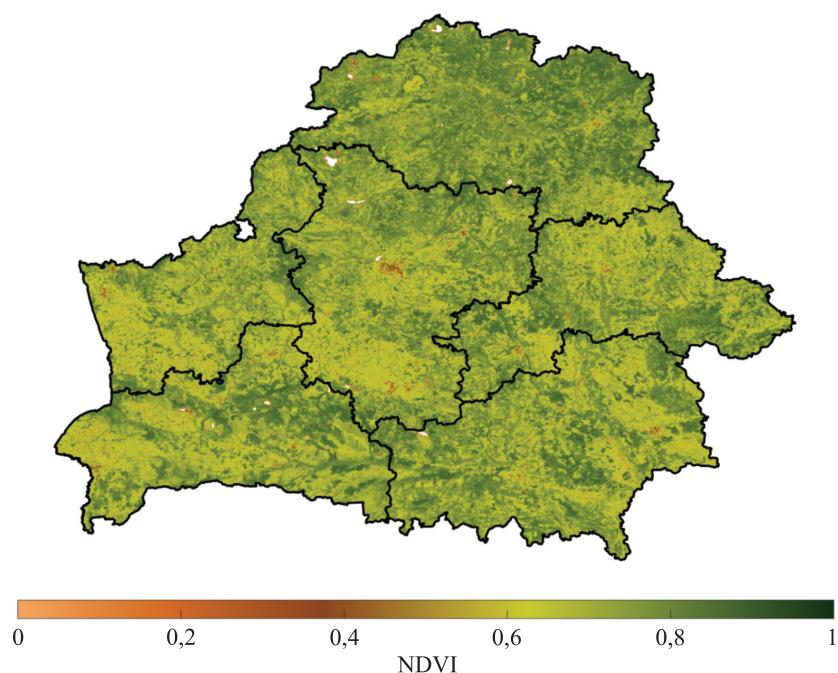
Индекс NDVI имеет ряд особенностей пространственного распределения, проявляющихся и на территории Беларуси. Во-первых, его величина сильно зависит от типа растительного покрова: для земель, где доминирует травянистая растительность, средние значения NDVI на 0,15–0,30 ниже, чем для лесных территорий. Во-вторых, NDVI зависит от биоразнообразия рассматриваемой местности: чем оно выше, тем больше значения NDVI. В совокупности эти две особенности приводят к тому, что на картах распределения NDVI часто проявляются физико-географические объекты: горные массивы, возвышенности, долины крупных рек. В-третьих, величина NDVI зависит от видов растений, преобладающих на той или иной территории (например, в умеренном поясе значения NDVI для хвойных лесов в среднем выше, чем для лиственных). В-четвертых, согласно последним исследованиям [7–11] изменения NDVI наиболее выразительно проявляются именно на территориях, где преобладает лесная растительность. Известно, что повышение значений NDVI обусловлено в том числе ростом концентрации CO₂ в атмосфере [7–11]. Поскольку занятые в сельском хозяйстве земли преимущественно представлены травянистыми экосистемами с относительно бедным биоразнообразием, то им свойственны пониженные значения NDVI, а их изменчивость менее выражена.

Распределение значений NDVI по территории Беларуси за период 2000–2016 гг. приведено на рис. 1. Как видно из рисунка, средние значения NDVI для нашей страны составляют 0,60–0,75, что является показателем богатого и развитого растительного покрова. Распределение значений NDVI по территории Беларуси не подчиняется закону широтной зональности, и в нем не прослеживается влияние континентальности климата. В условиях Беларуси пространственное распределение NDVI полностью определяется типом подстилающей поверхности (обрабатываемые и иные сельскохозяйственные земли, леса, земли под застройкой). Таким образом, оно является результатом совместного действия биогеографического, экологического и антропогенного факторов. Максимальные значения NDVI свойственны северу Беларуси, а минимальные – центральной части страны. Это обусловлено тем, что в северных регионах высока доля земель, покрытых лесами, причем эти леса состоят из хвойных пород деревьев (сосна и ель), а центральная часть Беларуси отличается наибольшей распаханностью территории. На юге страны, несмотря на большую площадь лесных земель, значения NDVI на 0,05–0,10 ниже, чем на севере, из-за распространения широколиственных пород деревьев.

Средние значения B_k для территории Беларуси за период 2001–2015 гг. составляют 175–185 баллов (рис. 2). В отличие от характера распределения значений вегетационного индекса NDVI в пространственном распределении значений B_k по территории Беларуси частично прослеживается широтная зональность: минимальные значения свойственны северным регионам, а максимальные – южным. Влияние континентальности климата на распределение значений B_k проявляется в том, что повышение значений B_k при продвижении с севера на юг в восточной части Беларуси происходит существенно быстрее. Однако на протяжении всего периода современного потепления климата (с конца 1980-х гг.) наблюдалось постепенное усиление неоднородности распределения температуры и количества осадков по территории Беларуси на местном уровне, результатом чего стало исчезновение черт широтной зональности в распределении значений B_k. Наиболее ярко эта особенность проявляется в 2001–2015 гг. [12; 13]. Текущая тенденция изменения значений B_k заключается в их повышении: относительно средних значений за первую фазу современного изменения климата (1989–2000) [12] значения B_k выросли на 10–15 баллов. Наименьший прирост отмечен для западных и юго-восточных регионов Беларуси (за исключением окрестностей станции Брагин), а наибольший – для северных.

¹MODIS Vegetation Index Products (NDVI and EVI) [Electronic resource]. URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproducts/mod13.php> (date of access: 10.02.2021).

²Monthly Mass Grids – Global mascons (JPL RL06_v02) [Electronic resource]. URL: https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/jpl_global_mascons/ (date of access: 10.02.2021).

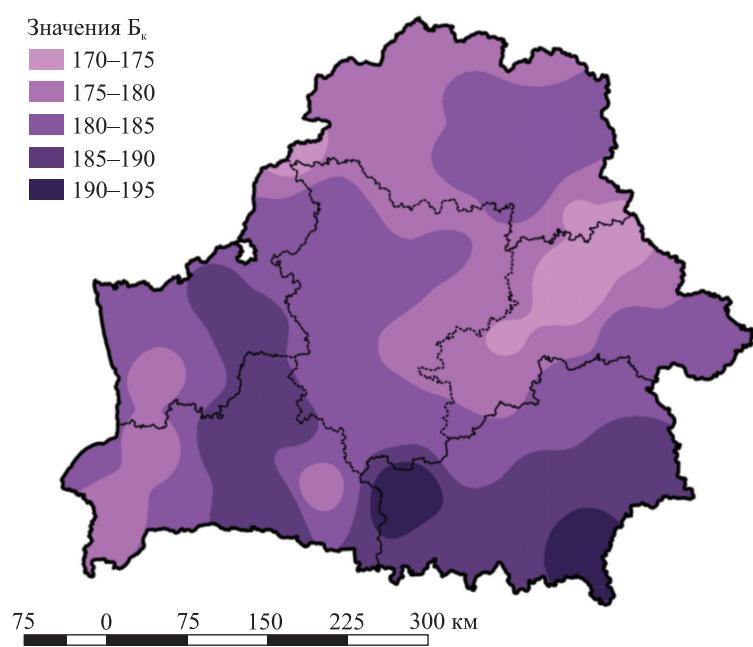


Ruc. 1. Средние значения индекса NDVI для территории Беларуси за летний период по данным MODIS за 2000–2016 гг.

Источник: [14]

Fig. 1. Average NDVI values for summer in Belarus in 2000–2016 according to MODIS data.

Source: [14]



Ruc. 2. Средние значения показателя биологической продуктивности для территории Беларуси за 2001–2015 гг.

Fig. 2. Average values of biological productivity parameter for Belarus in 2001–2015



Из рис. 1 и 2 следует, что характер распределения значений NDVI может объяснить причину формирования некоторых локальных аномалий распределения значений B_k . Так, одним из ярких примеров являются окрестности станции Полесская: на рис. 1 видно, что для данной территории свойственны пониженные значения NDVI, характерные для осущенных болот и заболоченных земель, покрытых травянистой растительностью.

Больше общих черт можно обнаружить при анализе пространственного распределения значений B_k и трендов изменений значений NDVI ($\partial \text{NDVI} / \partial t$) за аналогичный период времени (рис. 3).

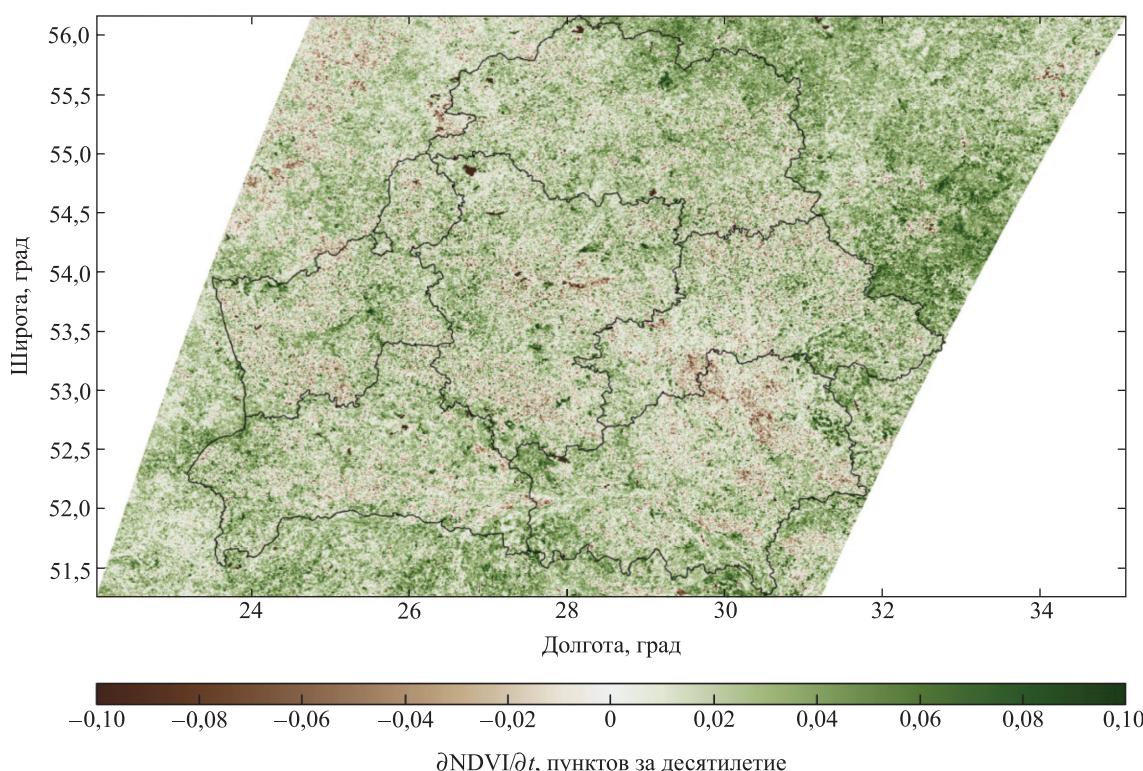


Рис. 3. Тренды изменений значений NDVI в Беларуси за 2001–2016 гг.

Источник: [14]

Fig. 3. NDVI trends in Belarus in 2001–2016.

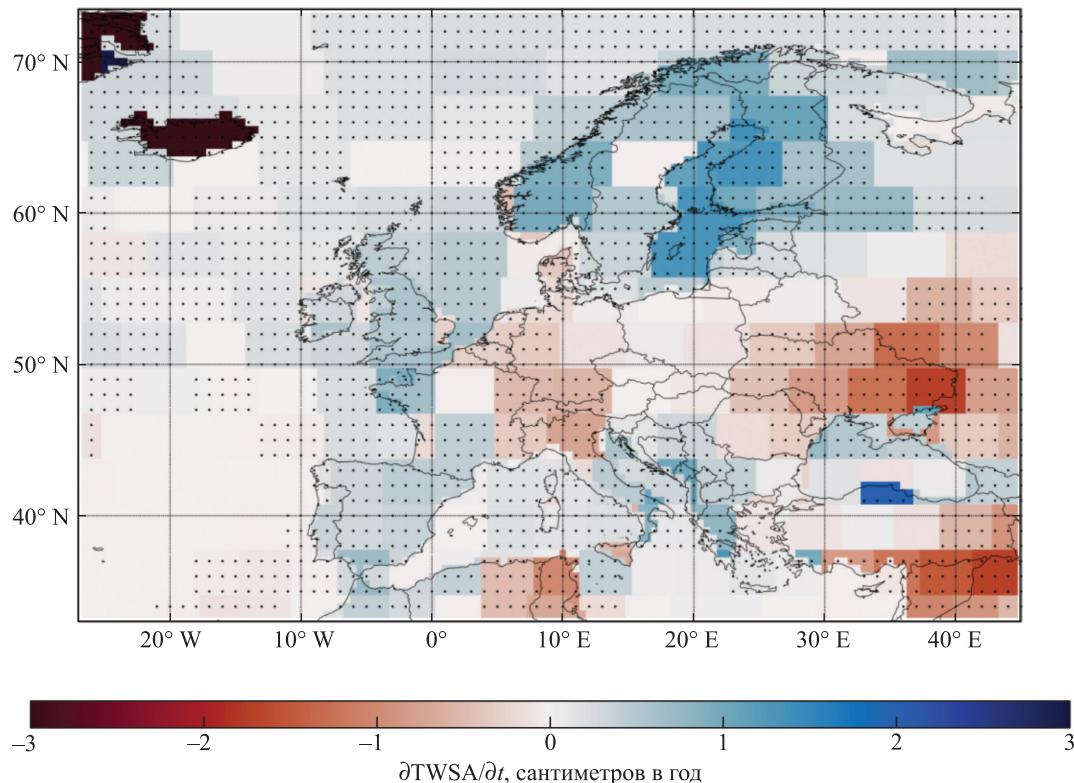
Source: [14]

Как видно из рис. 3, в целом для территории Беларуси характерно повышение значений NDVI примерно на 0,01–0,02 пункта за десятилетие, однако практически для всех обрабатываемых земель, за исключением северных регионов (Поозерская физико-географическая провинция), свойственна обратная тенденция – снижение на 0,015–0,025 пункта за десятилетие, наиболее выраженная в юго-восточной и западной частях Беларуси. Схожий характер изменений имеют значения B_k (см. рис. 2). Причина этого заключается в том, что западным регионам страны свойственен наименьший прирост ресурсов тепла и влаги, в то время как в юго-восточной части Беларуси наблюдается существенное увеличение тепловых ресурсов при незначительном повышении количества осадков. В результате это приводит к усилению засушливости [13]. На севере Беларуси отмечается прирост тепловых ресурсов при сохранении большого количества осадков, что создает более благоприятные условия для роста и развития растений [12] и, следовательно, повышения значений NDVI и B_k . Более мелкие особенности пространственного распределения значений $\partial \text{NDVI} / \partial t$ обусловлены особенностями растительного покрова, т. е. соотношением площадей лесных и обрабатываемых земель. Прирост значений NDVI на лесных землях составляет 0,025–0,040 пункта за десятилетие.

Большинство локальных особенностей и аномалий распределения $\partial \text{NDVI} / \partial t$ по территории Беларуси объясняются естественной или антропогенно обусловленной неоднородностью растительного покрова, преобладающими видами растений, типом почв, а также особенностями распределения температуры и количества осадков на местном уровне. Однако есть ряд аномалий распределения значений $\partial \text{NDVI} / \partial t$, причины формирования которых менее очевидны. Крупнейшие из них расположены на юго-востоке Беларуси, на границе Могилёвской и Гомельской областей, а также на юге Гомельской области. Формирование минимума значений $\partial \text{NDVI} / \partial t$ на территории между Бобруйском и Гомелем обусловле-



но следующими причинами: во-первых, в структуре земель здесь доминируют обрабатываемые земли, во-вторых, на этой территории преобладают супесчаные и песчаные грунты, а в-третьих, в указанном регионе происходит существенное снижение общих водозапасов. Последнее подтверждается данными измерений показателя TWSA³ (рис. 4). В юго-восточной части Беларуси отмечается снижение значений TWSA величиной около 1,5 см эквивалентного слоя воды в год, в то время как для остальной территории страны общая тенденция изменений TWSA примерно равна нулю. Формирование максимумов значений $\partial\text{NDVI}/\partial t$, расположенных на границах с Российской Федерацией и Украиной, имеет антропогенную природу: это зоны загрязнения Чернобыльской АЭС, где из-за вывода сельскохозяйственных земель из оборота происходит увеличение лесистости. Для данных территорий свойственны наибольшие темпы прироста значений NDVI за последние десятилетия.



*Rис. 4. Тренды изменений значений параметра TWSA для Европы за 2002–2017 гг.
(точками отмечены области со статистически значимыми изменениями TWSA).*

Источник: [14]

*Fig. 4. TWSA trends in Europe in 2002–2017
(dotted areas show regions with statistically significant TWSA changes).*

Source: [14]

Таким образом, на территории Беларуси для обрабатываемых земель характерно снижение значений NDVI, а для лесных – повышение, причем величина прироста NDVI практически одинакова для всех регионов страны (см. рис. 3). В предыдущих работах [12; 13] было показано, что повышение БКП территории Беларуси происходит преимущественно за счет увеличения тепловых ресурсов, тогда как количество осадков меняется незначительно. Следствием этого является постепенное усиление засушливости. В настоящее время оно не представляет серьезной проблемы, однако прогнозы изменения тепло- и влагообеспеченности территории Беларуси показывают, что наблюдаемые сейчас тенденции сохранятся в ближайшие десятилетия, поэтому в будущем отрицательный эффект изменений климата (усиление засушливости) может оказаться более значительным, чем положительный (повышение БКП) [15]. Но результаты измерений $\partial\text{NDVI}/\partial t$ свидетельствуют, что в сельскохозяйственных экосистемах из-за невысокого биоразнообразия негативные аспекты изменения климата уже проявляются более существенно, а положительные эффекты, связанные с повышением БКП и концентрации CO₂ в атмосфере, нивелируются.

³Monthly Mass Grids – Global mascons (JPL RL06_v02) [Electronic resource]. URL: https://grace.jpl.nasa.gov/data/get-data/jpl_global_mascons/ (date of access: 10.02.2021).



Анализ зависимости изменений значений NDVI от температуры и количества осадков (рис. 5) показал, что для обрабатываемых земель характерна относительно слабая отрицательная корреляция с изменениями температуры ($r = 0,25–0,35$), но сильная положительная корреляция с изменениями количества осадков ($r = 0,45–0,65$). Наиболее тесная связь отмечается в области минимума значений $\partial\text{NDVI}/\partial t$, расположенного на границе Могилёвской и Гомельской областей, которым свойственны наибольшая негативная тенденция изменений значений TWSA и наибольшая континентальность климата.

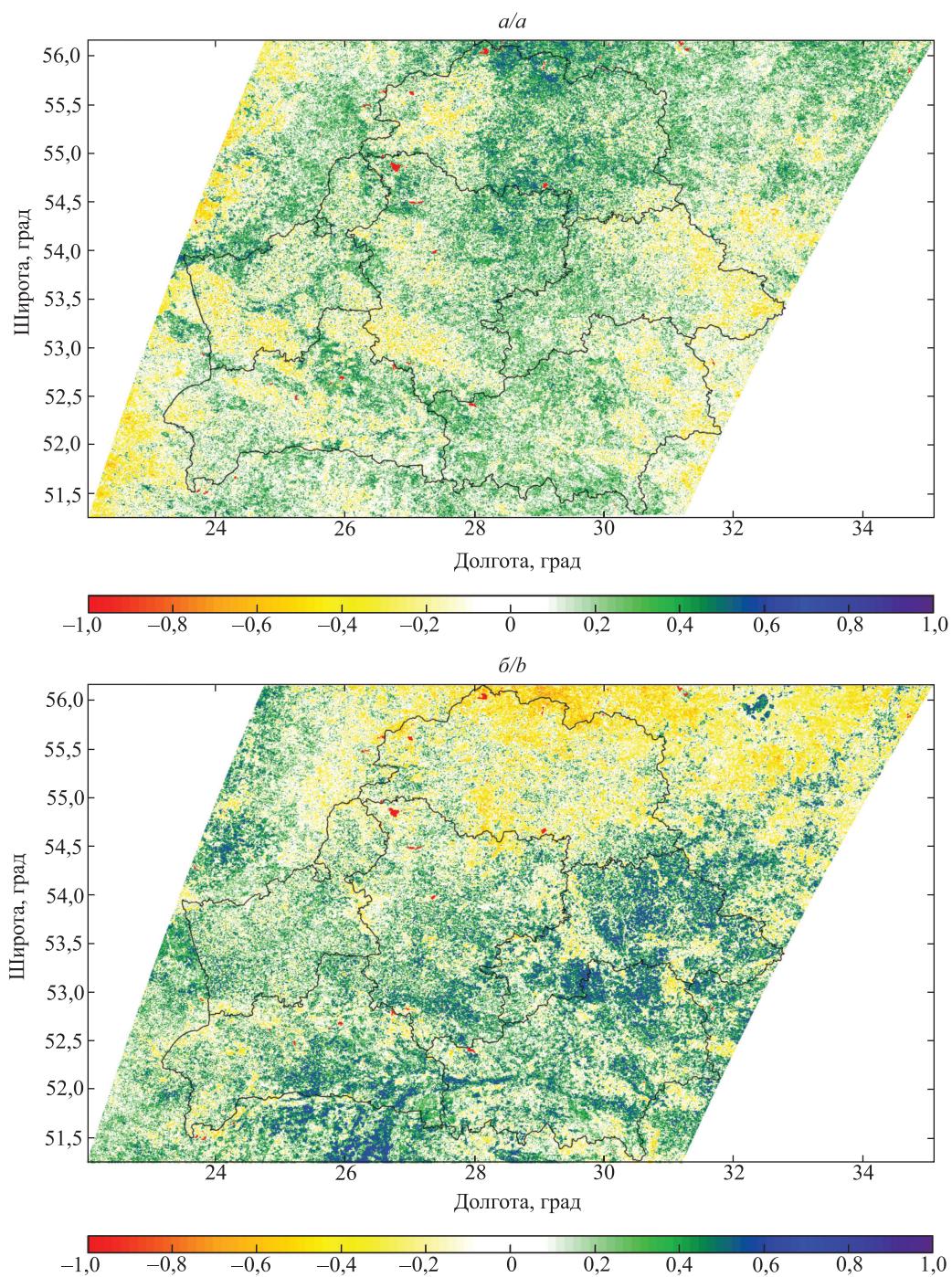


Рис. 5. Коэффициенты корреляции r между значениями индекса NDVI и средними температурами (a) и количеством осадков (b) за май – август для территории Беларусь за 2000–2017 гг.

Источник: [14]

Fig. 5. Correlation coefficient r between NDVI and average temperatures (a) and precipitation amount (b) for May – August in Belarus in 2000–2017.

Source: [14]



В то же время для лесных земель характерны слабая положительная корреляция с изменениями температуры ($r = 0,30\text{--}0,45$) и отрицательная корреляция с изменениями количества осадков ($r = 0,25\text{--}0,45$). Наиболее тесная корреляция между значениями NDVI и количеством осадков свойственна северной части Беларуси, где она достигает статистически значимых значений ($r > 0,5$). Причина этого заключается в самом типе растительного покрова. Древесная растительность обладает мощной и развитой корневой системой, проникающей на значительные глубины, благодаря чему она эффективнее поглощает как подземную влагу, так и влагу, поступающую из атмосферы в виде осадков. В условиях Беларуси древесная растительность лучше переносит засуху, поэтому наблюдаемые в настоящее время потепление и повышение содержания CO_2 будут иметь для нее положительный эффект. Сельскохозяйственные угодья – это преимущественно травянистые экосистемы. У травянистой растительности менее развитая корневая система, не позволяющая поглощать и задерживать поступающую из атмосферы влагу столь же эффективно, как корневая система древесной растительности. Кроме того, корни травянистых растений не могут достигать тех же глубин, что и корни деревьев. Таким образом, возможности травянистой растительности по поглощению влаги более ограничены, поэтому она более восприимчива к засухам. Этот негативный эффект усиливается бедным биоразнообразием экосистем обрабатываемых земель, в которых нередко наблюдается абсолютное доминирование лишь одного вида растений.

Заключение

Текущие тенденции изменения БКП показывают, что в настоящее время на территории Беларуси складываются благоприятные условия для роста и развития растений. В ближайшем будущем условия будут улучшаться. Ключевую роль при этом играет тип растительного покрова. Для лесов происходящие сейчас изменения климата в целом являются благоприятными и способствуют повышению NDVI, а следовательно, увеличению биомассы. В то же время на обрабатываемых землях прирост значений B_k не сопровождается повышением NDVI. Это связано с тем, что для большинства сельскохозяйственных культур, выращиваемых в Беларуси, ресурсы тепла достаточны, и главным лимитирующим фактором для них выступают доступные ресурсы влаги. В первую очередь это обусловлено самими биологическими особенностями сельскохозяйственных культур и бедным биоразнообразием сельскохозяйственных экосистем. Прирост значений B_k на территории Беларуси обеспечивается преимущественно повышением средних температур, поэтому в настоящее время параллельно с увеличением БКП происходит усиление засушливости. Обрабатываемые земли на территории Беларуси оказываются более чувствительными к негативным аспектам изменения климата. Таким образом, при разработке адаптационных мер для растениеводства в Беларуси наибольшее внимание следует уделять мероприятиям по повышению обеспеченности сельскохозяйственных культур ресурсами влаги и, самое главное, повышению уровня агротехники в целом.

Библиографические ссылки

1. Шашко ДИ. Агроклиматические ресурсы СССР. Ленинград: Гидрометеоиздат; 1985. 249 с.
2. Логинов ВФ, Лысенко СА. Современные изменения глобального и регионального климата. Минск: Беларуская наука; 2019. 315 с.
3. Chi Chen, Taejin Park, Xuhui Wang, Shilong Piao, Baodong Xu, Chaturvedi RK, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*. 2019;2(2):122–129. DOI: 10.1038/s41893-019-0220-7.
4. Zaichun Zhu, Shilong Piao, Myneni RB, Mengtian Huang, Zhenzhong Zeng, Canadell JG, et al. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*. 2016;6(8):791–795. DOI: 10.1038/nclimate3004.
5. Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications*. 2018;9:679. DOI: 10.1038/s41467-017-02810-8.
6. Логинов ВФ, Бровка ЮА. Сезонные особенности изменения климата Беларуси. В: Карабанов АК, редактор. *Природопользование. Выпуск 25*. Минск: Институт природопользования НАН Беларуси; 2014. с. 16–22.
7. Forzieri G, Alkama R, Miralles DG, Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread of greening of Earth. *Science*. 2017;356(6343):1180–1184. DOI: 10.1126/science.aal1727.
8. Jia-Wen Zhu, Xiao-Dong Zeng. Influences of the interannual variability of vegetation LAI on surface temperature. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 2016;9(4):292–297. DOI: 10.1080/16742834.2016.1189800.
9. Jiawen Zhu, Xiaodong Zeng. Comprehensive study on the influence of evapotranspiration and albedo on surface temperature related to changes in the leaf area index. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2015;32(7):935–942. DOI: 10.1007/s00376-014-4045-z.
10. Zhenzhong Zeng, Zaichun Zhu, Xu Lian, Laurent Z X Li, Anping Chen, Xiaogang He, et al. Responses of land evapotranspiration to Earth's greening in CMIP5 Earth System Models. *Environmental Research Letters*. 2016;11(10):104006. DOI: 10.1088/1748-9326/11/10/104006.
11. Swann ALS, Hoffman FM, Koven CD, Randerson JT. Plant responses to increasing CO_2 reduce estimates of climate impacts on drought severity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2016;113(36):10019–10024. DOI: 10.1073/pnas.1604581113.



12. Логинов ВФ, Хитриков МА. Пространственно-временные изменения биоклиматического потенциала территории Беларуси. *Весці Нацыянальнай акаадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных наукаў.* 2017;1:42–57.
13. Хитриков МА. Характеристика изменений биоклиматического потенциала Беларуси и сопредельных территорий Литвы и Украины за период 1977–2015 гг. *Природопользование.* 2018;1:135–149.
14. Логинов ВФ, Лысенко СА, Мельник ВИ. *Изменения климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования.* 2-е издание. Минск: Энциклопедикс; 2020. 263 с.
15. Хитриков МА. Прогноз изменений биоклиматического потенциала территории Беларуси. В: Гусаков ВГ, редактор. *Моладежь в науке – 2018: аграрные, гуманитарные, медицинские, физико-математические, физико-технические, химические науки. Материалы Международной конференции молодых ученых; 29 октября – 1 ноября 2018 г.; Минск, Беларусь.* Минск: Беларуская навука; 2019. с. 180–191.

References

1. Shashko DI. *Agroklimaticheskie resursy SSSR* [Agroclimatic resources of USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1985. 249 p. Russian.
2. Loginov VF, Lysenko SA. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern changes of global and regional climate]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2019. 315 p. Russian.
3. Chi Chen, Taejin Park, Xuhui Wang, Shilong Piao, Baodong Xu, Chaturvedi RK, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability.* 2019;2(2):122–129. DOI: 10.1038/s41893-019-0220-7.
4. Zaichun Zhu, Shilong Piao, Myneni RB, Mengtian Huang, Zhenzhong Zeng, Canadell JG, et al. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change.* 2016;6(8):791–795. DOI: 10.1038/nclimate3004.
5. Duveiller G, Hooker J, Cescatti A. The mark of vegetation change on Earth's surface energy balance. *Nature Communications.* 2018;9:679. DOI: 10.1038/s41467-017-02810-8.
6. Loginov VF, Brovka UA. Seasonal climate changes features of Belarus. In: Karabanov AK, editor. *Prirodopol'zovanie. Vypusk 25* [Nature management. Issue 25]. Minsk: Institute of Environmental Management, National Academy of Sciences of Belarus; 2014. p. 16–22. Russian.
7. Forzieri G, Alkama R, Miralles DG, Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread of greening of Earth. *Science.* 2017;356(6343):1180–1184. DOI: 10.1126/science.aal1727.
8. Jia-Wen Zhu, Xiao-Dong Zeng. Influences of the interannual variability of vegetation LAI on surface temperature. *Atmospheric and Oceanic Science Letters.* 2016;9(4):292–297. DOI: 10.1080/16742834.2016.1189800.
9. Jiawen Zhu, Xiaodong Zeng. Comprehensive study on the influence of evapotranspiration and albedo on surface temperature related to changes in the leaf area index. *Advances in Atmospheric Sciences.* 2015;32(7):935–942. DOI: 10.1007/s00376-014-4045-z.
10. Zhenzhong Zeng, Zaichun Zhu, Xu Lian, Laurent Z X Li, Anping Chen, Xiaogang He, et al. Responses of land evapotranspiration to Earth's greening in CMIP5 Earth System Models. *Environmental Research Letters.* 2016;11(10):104006. DOI: 10.1088/1748-9326/11/10/104006.
11. Swann ALS, Hoffman FM, Koven CD, Randerson JT. Plant responses to increasing CO₂ reduce estimates of climate impacts on drought severity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2016;113(36):10019–10024. DOI: 10.1073/pnas.1604581113.
12. Loginov VF, Khitrykau MA. Spatiotemporal changes of bioclimatic potential of the territory of Belarus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series.* 2017;1:42–57. Russian.
13. Khitrykau MA. The characteristics of bioclimatic potential changes in Belarus and neighboring regions of Lithuania and Ukraine in 1977–2015. *Nature management.* 2018;1:135–149. Russian.
14. Loginov VF, Lysenko SA, Mel'nik VI. *Izmeneniya klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, regulatory opportunities]. 2nd edition. Minsk: Entziklopediks; 2020. 263 p. Russian.
15. Khitrykau MA. Forecast of changes in the bioclimatic potential of the territory of Belarus. In: Gusakov VG, editor. *Molodezh' v nauke – 2018: agrarnye, gumanitarnye, meditsinskie, fiziko-matematicheskie, fiziko-tehnicheskie, khimicheskie nauki. Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh; 29 oktyabrya – 1 noyabrya 2018 g.; Minsk, Belarus'* [Youth in science – 2018: agrarian, humanitarian, medical, physical and mathematical, physical and technical, chemical sciences. Proceedings of the International conference of young scientists; 2018 October 29 – November 1; Minsk, Belarus]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2019. p. 180–191. Russian.

Статья поступила в редакцию 09.08.2020.
Received by editorial board 09.08.2020.