

С. А. Лысенко, М. А. Хитриков*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси Минск, Беларусь,
e-mail: lysenko.nature@gmail.com***ОЦЕНКИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ БИОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ГОМЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ**

Аннотация. Представлены актуальные оценки современных и прогнозы будущих изменений климата Гомельской обл. Беларуси. На основе данных дистанционного зондирования Земли проанализированы тренды изменений биоклиматических параметров различных типов земель (вегетационный и водный индекс, амплитуда суточного хода температуры, суммарное испарение и его составляющие) в пределах Гомельской обл. за период 2000–2023 гг. Показано, что статистически достоверным ($p < 0,05$) отрицательным трендом спектрального водного индекса, характеризующего содержание воды в почве и тканях растений, охвачено свыше 40 % пахотных земель Гомельской обл. Примерно на 20 % пахотных земель области отмечаются статистически достоверные тенденции снижения транспирации растений и роста испарения с почвы. Треть пахотных земель области подвержена усилению суточных колебаний температуры (коэффициент тренда до 0,3 °C/год). В противоположность этому на землях области со статистически достоверным ростом вегетационного индекса отмечаются снижение испарения с поверхности почвы, рост транспирации растительности и сокращение амплитуды суточных колебаний температур, что указывает на перспективность внедрения методов агролесоводства для улучшения биоклиматических показателей пахотных земель на юге Беларуси.

Ключевые слова: аридность климата, вегетационный индекс NDVI, водный индекс NDWI, эвапотранспирация, температура поверхности

S. A. Lysenko, M. A. Khitrykau*Institute of nature management of the National academy of sciences of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: lysenko.nature@gmail.com***ESTIMATION OF MODERN CHANGES IN THE BIOCLIMATIC CHARACTERISTICS
OF THE SOIL AND PLANT COVER OF THE HOMIEL REGION**

Abstract. The article presents actual assessments of current and projected climate changes in Homiel region of Belarus. Trends of changes in bioclimatic parameters of different land cover types (vegetation and water indices, daily temperature amplitudes, total evaporation and its components) within Homiel region have been analysed on the basis of remote sensing data for the period from 2000 to 2023. It was shown that statistically significant ($p < 0.05$) negative trend of spectral water index, characterising water content in soil and plant tissues, is observed on more than 40 % of arable land in Homiel region. About 20 % of arable lands of the region have statistically reliable tendencies of decrease in transpiration of plants and increase in evaporation from the soil. One third of arable land in the region is subjected to increased daily temperature fluctuations (trend coefficient up to 0.3 °C/year). In contrast, on the lands of the region with statistically significant growth of vegetation index there are decrease in evaporation from the soil surface and increase in transpiration of vegetation and reduction in daily temperature amplitudes, which indicates the prospect of introducing agroforestry methods to improve the bioclimatic indicators of arable land in the southern regions of Belarus.

Keywords: aridity of climate, NDVI, NDWI, evapotranspiration, surface temperature

С. А. Лысенка, М. А. Хітрыкаў*Інстытут прыродакарыстання Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,
e-mail: lysenko.nature@gmail.com***АЦЭНКІ СУЧАСНЫХ ЗМЕН БІЯКЛІМАТЫЧНЫХ ПАРАМЕТРАЎ
ГЛЕБАВА-РАСЛІНАГА ПОКРЫВА ГОМЕЛЬСКОЙ ВОБЛАСЦІ**

Анотацыя. Прадстаўлены актуальныя ацэнкі сучасных і прагнозы будучых змен клімату Гомельскай вобл. Беларусі. На аснове даных дыстанцыйнага заздзіравання Зямлі прааналізаваны трэндзы змен біякліматых параметраў розных тыпаў земляў (вегетатыўны і водны індэкс, амплітуда сутачнага хода тэмпературы, сумарнае выпарэнне і яго састаўляючыя) у межах Гомельскай вобл. за перыяд 2000–2023 гг. Паказана, што статыстычна пэўным ($p < 0,05$) адмоўным трэндам спектральнага воднага індэкса, які характарызуе колькасць вады ў глебе і тканках раслін, ахоплены звыш 40 % ворных зямель Гомельскай вобл. Прыкладна на 20 % ворных зямель вобласці адзначаюцца статыстычна пэўныя тэндэнцыі зніжэння транспірацыі раслін і росту выпарэння з глебы. Траціна ворных зямель вобласці схільна да ўзмацнення сутачных хістанняў тэмператур (каэфіцыент трэнду да 0,3 °C/год). У супрацьлегласць гэтаму на землях вобласці са статыстычна пэўным ростам вегетатыўнага індэкса адзначаюцца зніжэнне выпарэння з паверхні глебы, рост траспірацыі расліннасці і скарачэнне сутачных хістанняў тэмпературы, што сведчыць пра перспектыўнасць укаранення метадаў агралесаводства для паляпшэння біякліматых паказчыкаў ворных зямель на поўдні Беларусі.

Ключавыя словы: арыднасць клімату, вегетатыўны індэкс NDVI, водны індэкс NDWI, эвапатранспірацыя, тэмпература паверхні

Введение. Актуальность проблемы глобального потепления обусловлена тем, что оно проявляется не только в росте температур и с связанных с этим изменениях климата, но и в трансформациях окружающей среды в целом. Для Беларуси проблема современных изменений климата стоит особенно остро, так как на территории страны среднегодовая температура растет со скоростью, втрое превышающей скорость глобального потепления [1, 2]. Это приводит к смещению границ агроклиматических областей в северном направлении примерно на 10 км в год, уменьшению разницы между годовым количеством осадков и потенциальным испарением примерно на 6 мм в год и внутригодовому перераспределению количества выпадающих осадков (на большей части территории страны в летний период количество осадков не изменяется или повышается незначительно по сравнению с другими сезонами года) [1]. Все это в совокупности приводит к усилению засушливости (аридности) климата в Беларуси. Так, если раньше территория Беларуси относилась к зоне избыточного увлажнения [3], то сейчас потенциальное испарение превалирует над осадками почти на всей территории Брестской и Гомельской обл. Беларуси. Среднее для Беларуси значение индекса аридности (A/I), определяемого как отношение годовой суммы осадков к потенциальному испарению, с 1980 по 2020 г. уменьшилось на 30 % и в современный период составляет примерно 0,8.

Наиболее уязвимым перед современным изменением климата является регион Белорусского Полесья, подвергшийся в 1960–1970-е гг. осушительной мелиорации, результатом чего стала масштабная деградация торфяных почв. Данные наблюдений показывают, что климат мелиорированных территорий является наиболее экстремальным по ряду показателей: продолжительность и интенсивность заморозков, повторяемость зим с низкими температурами и малой высотой снежного покрова, продолжительность периодов с высокой температурой воздуха и др. [4, 5]. Усиление засушливости климата этого региона и нехватка почвенной влаги оказывают крайне негативное влияние на продуктивность большинства местных видов растительности и сельскохозяйственных культур, выращиваемых в данном регионе [2, 6–8].

В настоящей работе представлены актуальные оценки современных изменений климата Гомельской обл. и регионально адаптированные проекции его будущих изменений на основе ансамбля глобальных климатических моделей проекта CMIP6. Проанализированы тренды биоклиматических показателей земель региона, рассчитанные по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) за 2000–2023 гг. В числе рассматриваемых показателей – нормализованные разностные спектральные индексы, характеризующие фотосинтетически активную биомассу и содержание воды в почвенно-растительном покрове; амплитуда суточных колебаний температуры земной поверхности; суммарное испарение и ее составляющие (транспирация растительности и испарение с почвы). Оценивается процент земель области и отдельно – сельскохозяйственных земель с ухудшением биоклиматических показателей на уровне статистической значимости 0,05. Анализируется изменение биоклиматических показателей на землях со статистически достоверным ростом вегетационного индекса.

Оценки современных и прогнозы будущих изменений климата Гомельской обл. Изменения климатических параметров на территории Гомельской обл. анализировались с использованием разработанного в Институте природопользования НАН Беларуси и регулярно обновляемого цифрового сеточного архива метеорологических данных, который объединяет среднемесячные метеорологические ряды наблюдений для территории Беларуси и соседних государств и использует методы пространственной интерполяции для построения метеорологических полей на равномерной сетке географических координат и автозаполнения пропусков в данных [9].

Среднегодовая температура в Гомельской обл. за период 1991–2020 гг., рекомендуемый Всемирной метеорологической организацией для климатического усреднения, превысила ее значение за предшествующий период (1961–1990 гг.) на 1,3 °С (рис. 1, а). Аналогичный рост средней температуры для сезонов составил: зимой – 1,91 °С, летом – 1,36 °С, весной – 1,19 °С, осенью – 0,67 °С. Анализ изменения температуры на основе первой эмпирической ортогональной компоненты ее временного ряда [1] дает следующие оценки потепления в Гомельской обл.: +1,50 °С – зимой, +1,70 °С – летом, +1,23 °С – весной, 1,12 °С – осенью, + 1,54 °С – в среднем за год.

Годовая сумма атмосферных осадков за прошедший период потепления в среднем по Гомельской обл. увеличилась незначительно – на 18 мм, или на 3 % от нормы 1961–1990 гг. (рис. 1, б). Однако на западе региона увеличение годовой суммы осадков достигало 60 мм. Одновременно с этим годовая сумма осадков статистически достоверно понизилась на северо-востоке области (максимально на 100 мм).

Сумма зимних осадков в среднем по области увеличилась на 4,5 % от нормы 1961–1990 гг. Рост осадков произошел главным образом за счет центральной части области. Статистически достоверное понижение суммы зимних осадков отмечается только на северо-востоке области.

Средняя по области сумма летних осадков уменьшилась на 4 %. Максимальное уменьшение суммы летних осадков (на 24 %) отмечалось на северо-востоке области. Заметно увеличилась сумма осадков

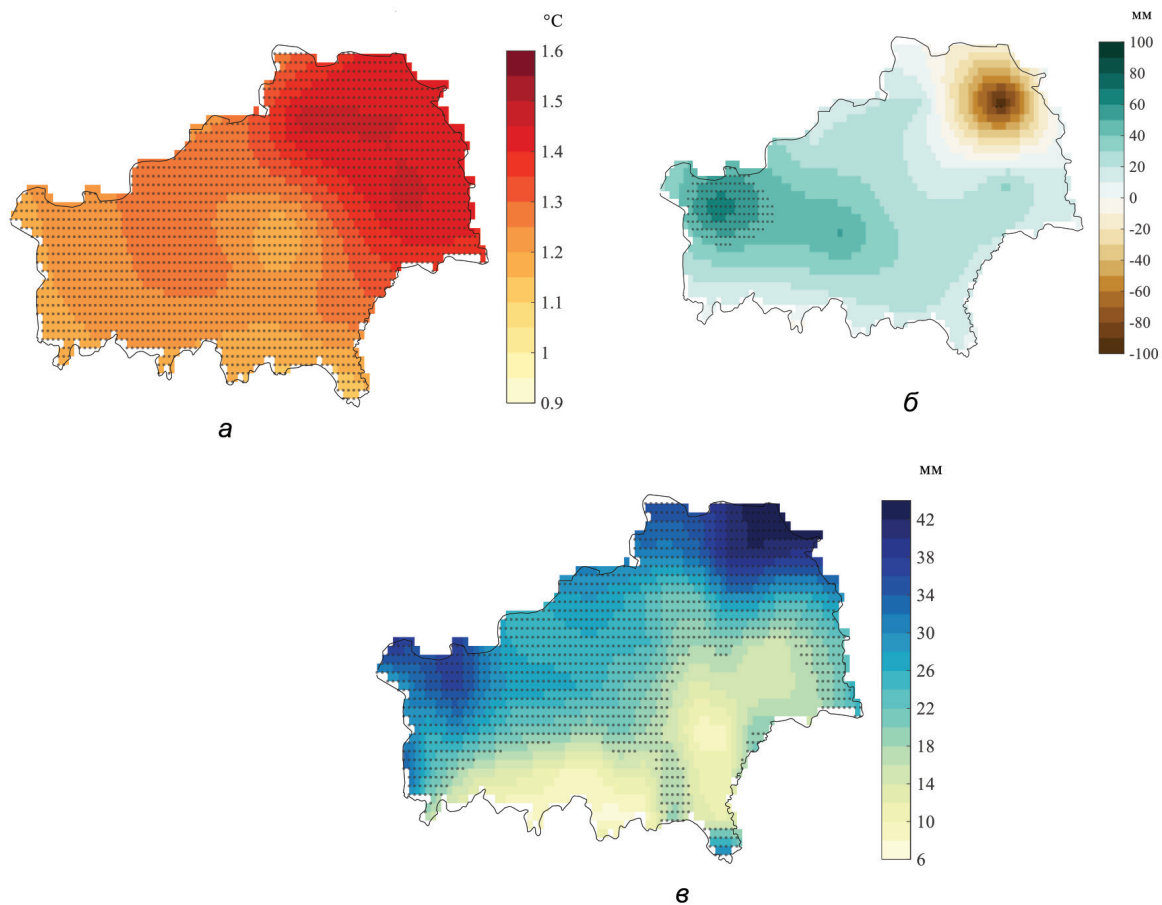


Рис. 1. Карты изменений среднегодовых значений температуры (а), атмосферных осадков (б) и суммарного испарения (в) на территории Гомельской обл. (точками отмечены районы со статистически значимыми ($p < 0,01$) изменениями климатических параметров)

для весеннего периода – на 13,7 %. Исключение составила лишь небольшая северо-восточная часть области. Сумма осадков для осеннего периода также увеличилась (в среднем на 8,6 %), однако это увеличение не отвечает критериям статистической значимости.

Среднегодовое испарение на территории Гомельской области (рис. 1, в) в результате потепления увеличилось на 22,7 мм (примерно на 5,2 % по отношению к периоду 1961–1990 гг.). Наиболее существенный рост испарения +7,4 %, или 10,3 мм по отношению к периоду 1961–1990 гг., отмечался весной, что вызвано ускоренным снеготаянием и более ранним наступлением вегетационного периода. Испарение в летний период, несмотря на достаточно интенсивное летнее потепление, увеличилось на сравнительно небольшую величину – 2,8 % (+7 мм), что, по-видимому, связано с уменьшением влажности почвы и понижением уровней поверхностных вод в результате частых засух и уменьшения летнего стока. Средняя эвапотранспирация для осеннего периода в результате потепления почти не изменилась.

Для того чтобы оценить масштаб рисков, обусловленных усилением засушливости, рассмотрим изменения индекса аридности на территории Гомельской обл. В настоящей работе используется метод вычисления AI на основе среднего за многолетний период отношения сумм атмосферных осадков (P) и потенциального испарения (ET_0) (испаряемости):

$$AI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{ET_0}, \quad (1)$$

где индекс i обозначает год, к которому относятся значения осадков и потенциального испарения, n – длительность периода (в годах), используемого для усреднения отношения P/ET_0 .

Испаряемость ET_0 показывает потенциально возможное (не лимитируемое запасами воды) испарение в данной местности при существующих в ней атмосферных условиях. Согласно методике FAO 56 [10] ET_0 вычисляется на основе уравнения Пенмана–Монтейса и уравнения энергетического баланса.

Испаряемость рассчитывается для эталонной поверхности без дефицита воды, за которую принимается гипотетический травяной покров со специфическими характеристиками. Эталонное суммарное испарение ET_0 определяется по формуле:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{0,925}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}, \quad (2)$$

где ET_0 – эталонная эвапотранспирация (мм сут^{-1}); R_n – чистая радиация на поверхности культуры ($\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$); G – плотность теплового потока почвы ($\text{МДж м}^{-2} \text{сут}^{-1}$); T – среднесуточная температура воздуха на высоте 2 м ($^{\circ}\text{C}$); u_2 – скорость ветра на высоте 2 м (мс^{-1}); e_s – давление насыщенного пара (кПа); e_a – фактическое давление пара (кПа); $(e_s - e_a)$ – дефицит давления насыщенного пара (кПа); Δ – наклон кривой давления пара (кПа К^{-1}); γ – психрометрическая постоянная (кПа К^{-1}).

С точки зрения сельского хозяйства наибольшее значение имеет влагообеспеченность мая и июня, поскольку именно на эти месяцы приходится основной период роста и развития яровых культур. Результаты расчетов индекса аридности территории Беларуси для данных месяцев, характеризующие период 2000–2022 гг., представлены на рис. 2.

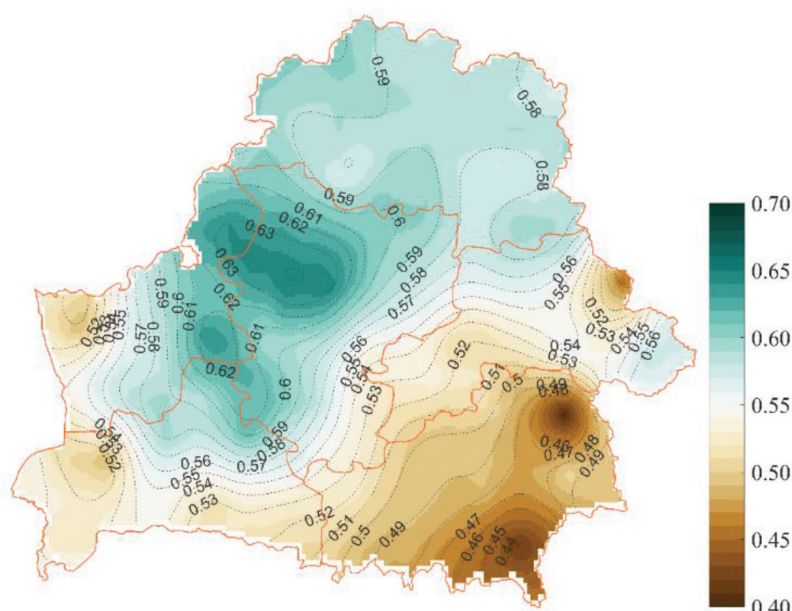


Рис. 2. Пространственное распределение индекса аридности для мая – июня с усреднением за 2000–2022 гг.

Как видно из рис. 2, для территории Гомельской обл. проблема усиления засушливости климата стоит наиболее остро. До начала периода современного потепления в Беларуси (1961–1990 гг.) индекс аридности Гомельской обл. изменялся в пределах от 0,52 до 0,63. В современный период (2000–2022 гг.) его значения находятся в диапазоне 0,43–0,51, что в методике глобального агроэкологического зонирования ФАО соответствует семиаридным районам.

Прогнозы будущих изменений климата основываются на расчетах глобальных климатических моделей. Авторами для этой цели использовался ансамбль моделей, объединенных в последней (шестой) фазе международного проекта CMIP. Антропогенные воздействия учитываются в климатических моделях как форсинги, вызывающие изменение климата. Различные гипотетические варианты антропогенных форсингов принято называть сценариями. Рассматривались четыре сценария, разработанные межправительственной группой экспертов по изменению климата на основе прогнозов развития мировой экономики и социально-экономических процессов.

Проект CMIP6 объединяет свыше 30 численных моделей климата, однако не все они одинаково хорошо воспроизводят особенности изменения климата в Беларуси. Ретроспективные расчеты по каждой модели тестировались на региональном уровне путем сравнения. Для каждого из анализируемых климатических параметров определялся наилучший для его прогнозирования ансамбль из 10 моделей с наибольшим коэффициентом корреляции между фактическими и прогнозными значениями данного параметра для ретроспективного периода.

Проекции на конец текущего столетия средней температуры и суммы атмосферных осадков в Гомельской обл., рассчитанные для теплого периода года с использованием оптимальных ансамблей климатических моделей, представлены на рис. 3. Выбранный ансамбль моделей достаточно хорошо воспроизводит тренды изменений температуры и атмосферных осадков для ретроспективного периода (систематические ошибки моделей устранены на этапе формирования оптимальных ансамблей). Тренд изменения температуры за период с начала потепления в Беларуси и до настоящего времени лучше всего согласуется с климатической проекцией для сценария SSP3–7.0. В проекциях изменений суммы атмосферных осадков, как и в данных наблюдений, статистически значимый тренд до середины текущего столетия отсутствует.

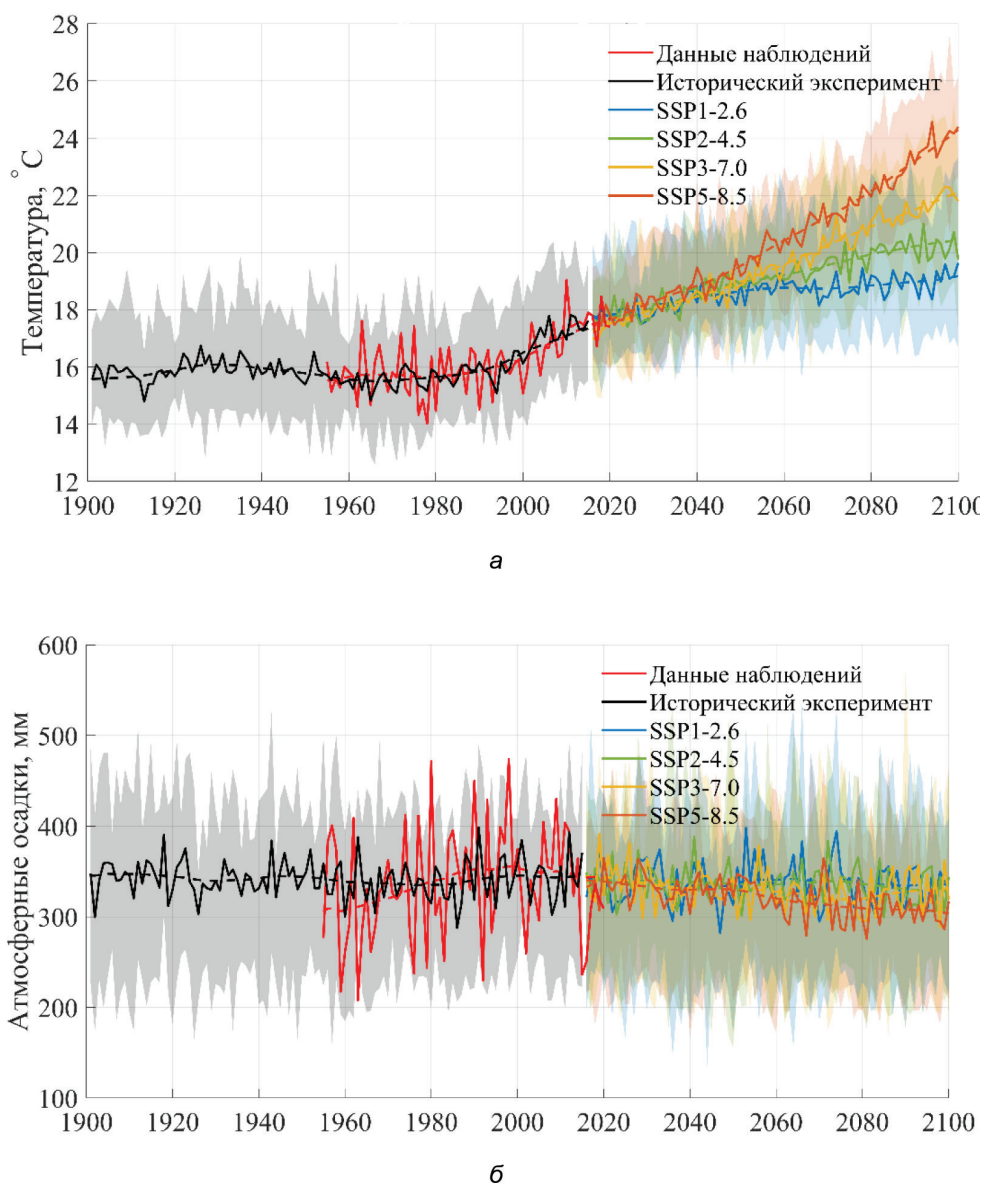


Рис. 3. Прогнозы средней температуры (а) и суммы атмосферных осадков (б) в теплый период года (май – сентябрь) для ретроспективного и будущего периодов в четырех сценариях антропогенного радиационного воздействия (SSP)

Согласно представленным расчетам к середине текущего столетия ожидается рост средней температуры в теплый период года на 3,0–3,8 °C относительно базового периода 1961–1990 гг. Проекция изменения температуры на конец столетия для разных сценариев существенно различаются – от 3,3 °C в сценарии SSP1–2.6 до 7,6 °C в сценарии SSP5–8.5. Значимых изменений суммы атмосферных осадков в теплый период года до середины столетия не ожидается, после чего возможно их небольшое уменьшение (к концу столетия на 7,7 %) только в сценарии SSP5–8.5.

При почти неизменной сумме атмосферных осадков в теплый период года, что имеет место для территории Гомельской обл. и прогнозируется как минимум до середины текущего столетия, и росте температур, соответствующем одному из самых жестких сценариев глобального потепления SSP3–7.0, разность между потенциальным испарением и осадками продолжит возрастать, причем с ускорением. Это означает, что аридизация климата в данном регионе будет только усиливаться, влияя на природную среду, экономику и условия проживания людей. В этой связи рассмотрим оценки влияния аридизации на биоклиматические показатели и водный режим земель в Гомельской обл.

Оценки изменений биоклиматических показателей земель по данным ДЗЗ. Оценки изменений состояния почвенно-растительного покрова на территории Гомельской обл. за период потепления проводились с использованием вегетационного NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и водного NDWI (Normalized Difference Water Index) индексов, определяемых по спектру отражения солнечного излучения от земной поверхности, с учетом характерных полос поглощения света хлорофиллом и водой в почвенно-растительных покровах.

Индекс NDVI вычисляется с использованием спектральных каналов 620–670 нм (красный) и 841–876 нм (ближний ИК-диапазон) фотоприемной аппаратуры спутникового прибора MODIS. Выбор каналов основан на свойстве зеленой растительности избирательно поглощать солнечное излучение в красном участке спектра и эффективно отражать его в ближнем ИК-диапазоне, что позволяет достаточно надежно отделять растительность от прочих природных и антропогенных объектов на многоспектральных спутниковых снимках. Для растительности NDVI всегда принимает положительные значения и растет с увеличением зеленой фитомассы [11].

Для вычисления водного индекса NDWI используются два приемных канала спутниковой аппаратуры Landsat 7, 8 из зеленой области спектра (0,52–0,6 мкм) и коротковолнового инфракрасного диапазона (1,55–1,75 мкм). Данный индекс является высоко чувствительным к изменениям содержания воды в почвенно-растительных покровах. Выбор длин волн основан на особенностях спектра поглощения воды, имеющей минимум поглощения в видимой области и высокие значения в ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах.

Оценки изменений вегетационного NDVI и водного NDWI индексов на территории Гомельской обл. производились на основе спутниковых снимков MODIS и Landsat 7, 8, имеющих разрешение 250 и 30 м соответственно. Расчеты выполнялись с использованием программного интерфейса пользователя (API) облачной платформы анализа и обработки геопространственных данных Google Earth Engine на языке программирования Python [12].

Амплитуда суточного хода температуры рассчитывалась на основе спутниковых данных MODIS по дневной и ночной температурам подстилающей поверхности с пространственным разрешением около 1 км.

Расчет изменений эвапотранспирации и ее составляющих (транспирация растительности, испарение с почвы, испарение осадков, перехваченных растительностью) выполнялся по комбинированной биофизической модели Пенмана–Монтейта–Леунинга (PML), которая в качестве входной информации использует данные спутниковых наблюдений и реанализ GLDAS (Global Land Data Assimilation System – Глобальная система ассимиляции данных о земле).

В основе PML-модели лежит расчет эвапотранспирации на основе уравнений теплового баланса и массопереноса с открытой водной поверхностью, впервые предложенных Г. Л. Пенманом [13] и модифицированных Дж. Монтейтом [14]. Позднее уравнение Пенмана–Монтейта (модель PM или FAO-56) было доработано Р. Леунингом формулировкой поверхностной проводимости, в которой учтены физические характеристики растительного покрова и потеря влаги почвой (модель PML) [15]. Модель PML была усовершенствована за счет включения испарения осадков, перехватываемых растениями, и разделения компонент суммарной эвапотранспирации на испарение с почвы E_s , транспирацию растительности E_t и испарения осадков, задержанных растительностью E_i (модель PML_V1) [16]. Впоследствии модель PML_V1 была соединена с биофизической проводимостью полого, что дало возможность использовать ее для расчета валовой первичной продукции (модель PML_V2) [17].

Для численных расчетов изменений эвапотранспирации и ее составляющих была выбрана реализация модели PML на базе облачной платформы обработки и анализа геопространственных данных Google Earth Engine (GEE). Схема работы модели подробно описана в работе [18].

Все упомянутые выше биоклиматические параметры подстилающей поверхности рассчитывались с осреднением для теплого периода года. Для оценок трендов их изменений использовался метод Тейла–Сена, менее чувствительный к выбросам (аномалиям в данных), чем классический метод наименьших квадратов. Данный метод определяет коэффициент линейного тренда как медиану коэффициентов наклона прямых, построенных по всем парам точек временного ряда. Статистическая значимость трендов оценивалась на основе непараметрического теста Манна–Кендалла [19].

Тренды рассматриваемых биоклиматических параметров земель Гомельской обл., соответствующие периоду 2000–2023 гг., представлены на рис. 4–8.

Оценки тренда вегетационного индекса NDVI косвенно подтверждают негативное влияние усиления засушливости климата на биологическую продуктивность земель Гомельской обл. – отрицательному тренду NDVI подвержено свыше 60 % земель области. Статистически достоверный отрицательный тренд NDVI ($p < 0,05$) отмечается на 12 % земель области и на 36 % пахотных земель. Вегетационный индекс земель лесного фонда и водно-болотных угодий изменяется незначительно либо даже увеличивается (максимально на 1,5 % в год).

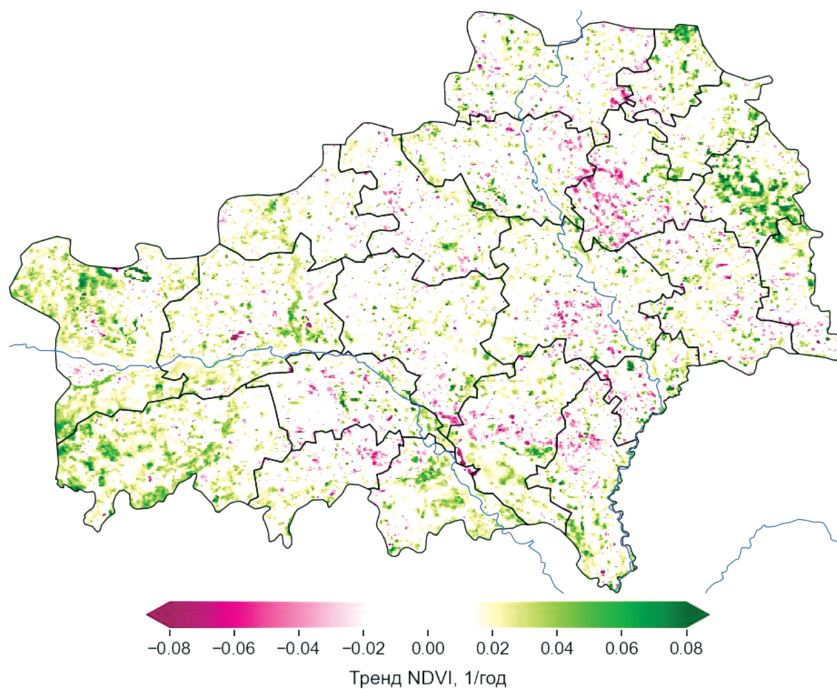


Рис. 4. Карта коэффициента линейного тренда вегетационного индекса NDVI для территории Гомельской обл.

Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусском Полесье подробно исследовано [6–8]. Показано, что в современный период главным фактором, ограничивающим рост биопродуктивности наземных экосистем в данном регионе, является количество атмосферных осадков. Территория Белорусского Полесья по своим биоклиматическим характеристикам в настоящее время относится к зоне с избыточными для фотосинтеза ресурсами тепла и солнечной радиации, но недостаточными ресурсами влаги. Рост температуры и усиление засушливости климата оказывают крайне негативное влияние на биопродуктивность местных экосистем, приводя к потерям запасов в них углерода со скоростью около 750 000 т/год [15]. Особенно остро это проявляется в отношении биологической продуктивности пахотных земель, листовой индекс которых согласно данным дистанционного зондирования Земли понижается со скоростью до 2 % в год [7].

Ранее нами были рассмотрены прямые и обратные связи между температурой воздуха, почвы и растительным покровом для территории Беларуси в летний период [20]. Результаты, полученные в ходе исследования, показывают, что деградация растительного покрова на юге Беларуси сопровождается аномальным ростом температуры почвы и амплитуды ее внутрисуточных колебаний. Свыше половины деградирующих земель (58 %) относится к землям сельскохозяйственного назначения и находится в южной части страны, где быстрое летнее потепление сопровождается усилением засушливости климата. На землях сельскохозяйственного назначения снижение растительного покрова может обуславливать свыше четверти роста средней летней температуры. В свою очередь, рост температуры усиливает потери почвенной влаги на испарение, что в засушливых условиях приводит к угнетению растительности и еще большему сокращению растительного покрова. Эти процессы составляют основу положительных обратных связей между температурой, почвенной влагой и наземной растительностью, ускоряющих деградацию земель в условиях изменения климата. Триггером для запуска таких обратных связей может быть либо частичный свод растительности в результате различных хозяйственных мероприятий, либо недостаточные меры по адаптации сельского и лесного хозяйства к изменению климата.

Наиболее красноречивым свидетельством ухудшающегося водного режима почв Гомельской обл. является карта тренда водного индекса NDWI, представленная на рис. 5. В результате изменения климата водный индекс, характеризующий содержание воды в почве и растительных покровах, уменьшается более чем на 80 % территории Гомельской обл. Максимальная скорость его уменьшения отмечается для водно-болотных угодий и земель сельскохозяйственного назначения, минимальная – для лесных массивов. Около 40 % пахотных земель области демонстрируют статистически достоверную ($p < 0,05$) тенденцию уменьшения водного индекса NDWI.

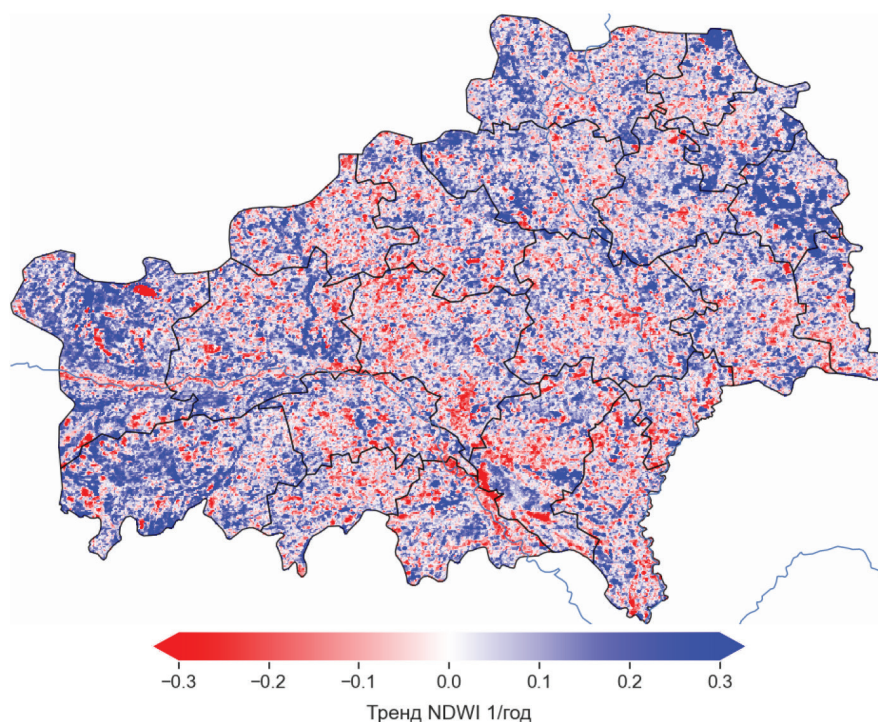


Рис. 5. Карта коэффициента линейного тренда водного индекса NDWI

Статистически достоверный рост NDWI отмечается для более чем половины земель лесного фонда, что свидетельствует о высокой эффективности лесных биоценозов в сохранении водных ресурсов за счет регулирования ими поверхностного и подземного стоков. Лесные почвы, обладающие высокой инфильтрационной способностью, не позволяют атмосферным осадкам и талым водам расходоваться в виде поверхностного стока, что способствует их накоплению в почве и водоносных слоях.

Скорость потепления для теплого периода года во многом зависит от радиационных и эвапотранспирационных факторов регулирования температуры подстилающей поверхности. В этой связи представляет интерес проанализировать изменения эвапотранспирации и ее составляющих в условиях изменяющегося климата. Карты распределения трендов испарения с почвы E_s и транспирации растительности E_c , построенные по модели PML_V2, представлены для Гомельской обл. на рис. 6 и 7. Средние значения составляющих эвапотранспирации и коэффициенты их трендов для периода 2000–2020 гг. представлены с разделением по типу земель в таблице.

Средние значения и коэффициенты линейных трендов составляющих суммарного испарения для трех категорий земель Гомельской обл.

Категория земель	Среднее значение, мм			Коэффициент тренда, мм/год		
	E_s	E_c	E_i	E_s	E_c	E_i
Пашни	76,5	238,5	23,7	+0,19	-0,50	-0,05
Леса	34,9	241,6	55,2	-0,38	+0,44	+0,12
Болота	64,26	215,7	39,6	-0,45	+0,40	+0,14

Суммарное испарение примерно на 70 % состоит из транспирации растительности, вклад испарения с почвы для лесных и заболоченных земель составляет 20–23 %, для земель сельскохозяйственного назначения – около 10 %. В пространственном распределении трендов компонент суммарного

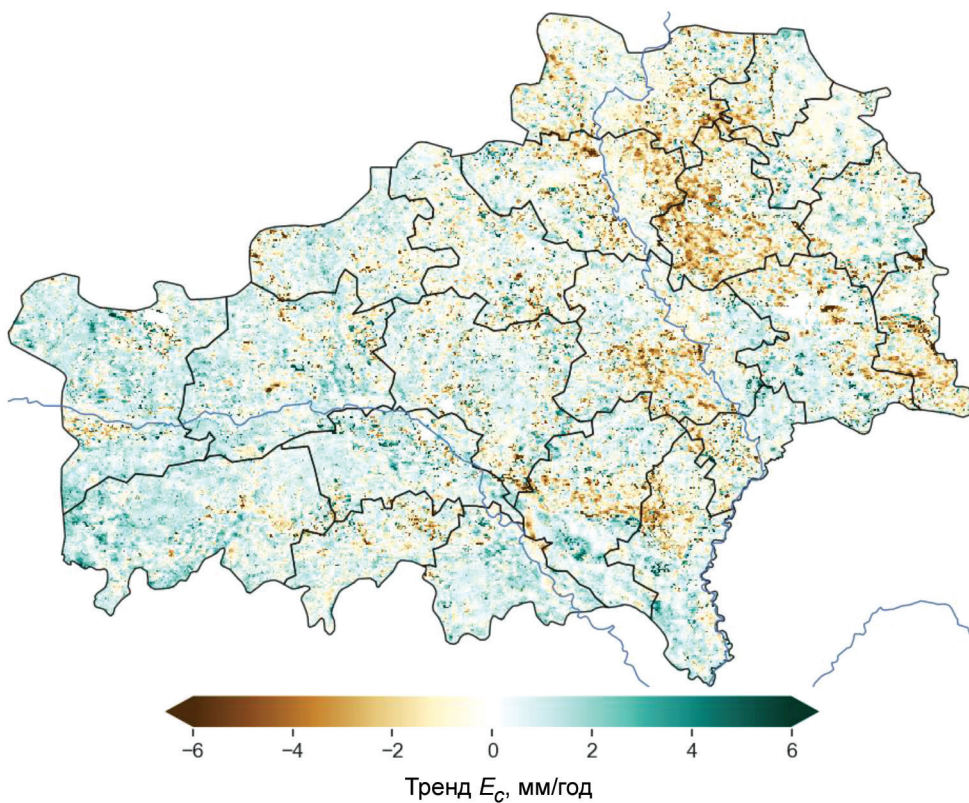


Рис. 6. Коэффициент линейного тренда транспирации растительности в вегетационный период (май – сентябрь)

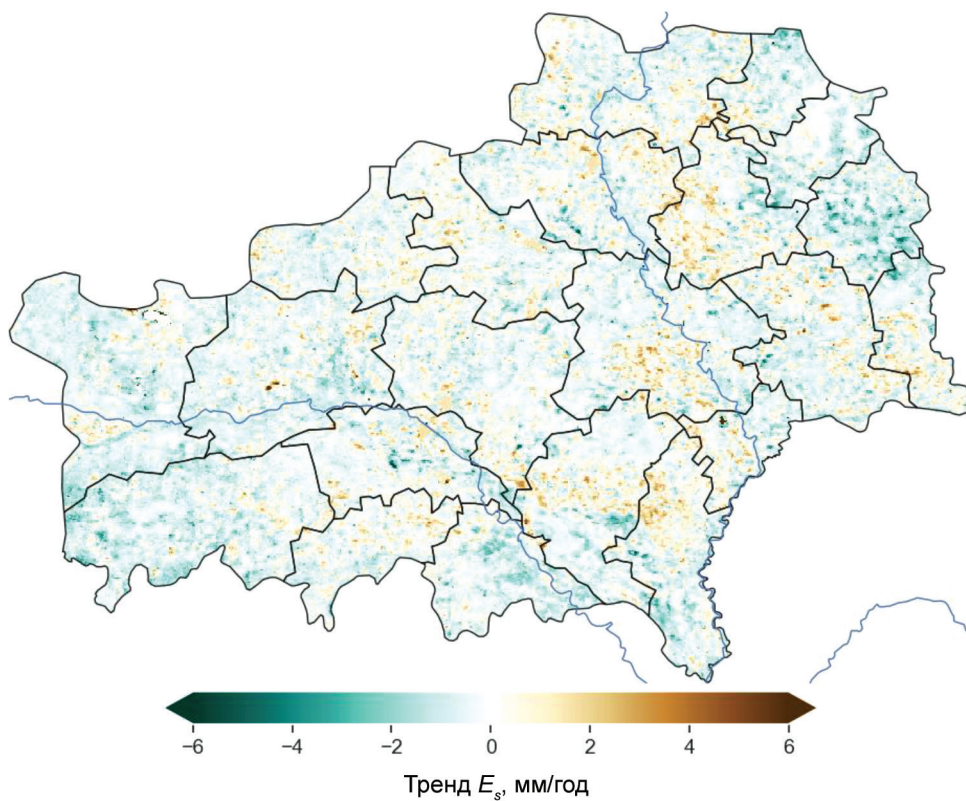


Рис. 7. Коэффициент линейного тренда испарения с почвы в вегетационный период

испарения прослеживаются те же особенности, что и в распределении тренда вегетационного индекса NDVI. В районах с положительным и статистически достоверным трендом NDVI отмечается увеличение E_c и уменьшение E_s , противоположные тенденции наблюдаются в районах со статистически достоверным отрицательным трендом NDVI.

Наибольшему изменению подвержена составляющая суммарного испарения, связанная с транспирацией E_c . В результате потепления ее увеличение отмечается на 74 % площади Гомельской обл. Особенно интенсивен ее рост на лесных землях – положительным трендом E_c охвачено 69 % общей площади лесных массивов области. Транспирация на землях сельскохозяйственного назначения преимущественно уменьшается (статистически достоверно для 22,5 % пахотных земель), что в условиях потепления снижает возможности естественной терморегуляции растений и делает их более уязвимыми перед волнами тепла и засухами.

Испарение с почвы увеличивается более чем на половине (53 %) пахотных земель и лишь на 22 % земель лесного фонда Гомельской обл. Статистически достоверным увеличением E_s ($p < 0,05$) характеризуются около 18 % пахотных и менее 2 % лесных земель области.

На пахотных землях со статистически достоверным отрицательным трендом вегетационного индекса NDVI ($p < 0,01$) испарение с почвы увеличивается в 76 % случаев. В противоположность этому на лесных почвах со статистически достоверным положительным трендом NDVI испарение уменьшается в 87 % случаев. Похожая тенденция отмечается и для заболоченных земель – E_s уменьшается на 86 % переувлажненных земель со статистически достоверным положительным трендом NDVI.

Еще одной тревожной климатической тенденцией, свойственной пахотным землям Гомельской обл., является увеличение амплитуды суточных колебаний их температуры (рис. 8). В результате усиления атмосферного стока влаги почвы региона становятся более сухими, а значит, более подверженными перегреву в дневное и переохлаждению в ночное время суток, что повышает вероятность теплового стресса и заморозков для растений. Важно отметить, что статистически достоверное усиление суточных колебаний температуры в современный период наблюдается примерно для трети пахотных земель Гомельской обл., что представляет серьезную проблему для развития сельского хозяйства в регионе.

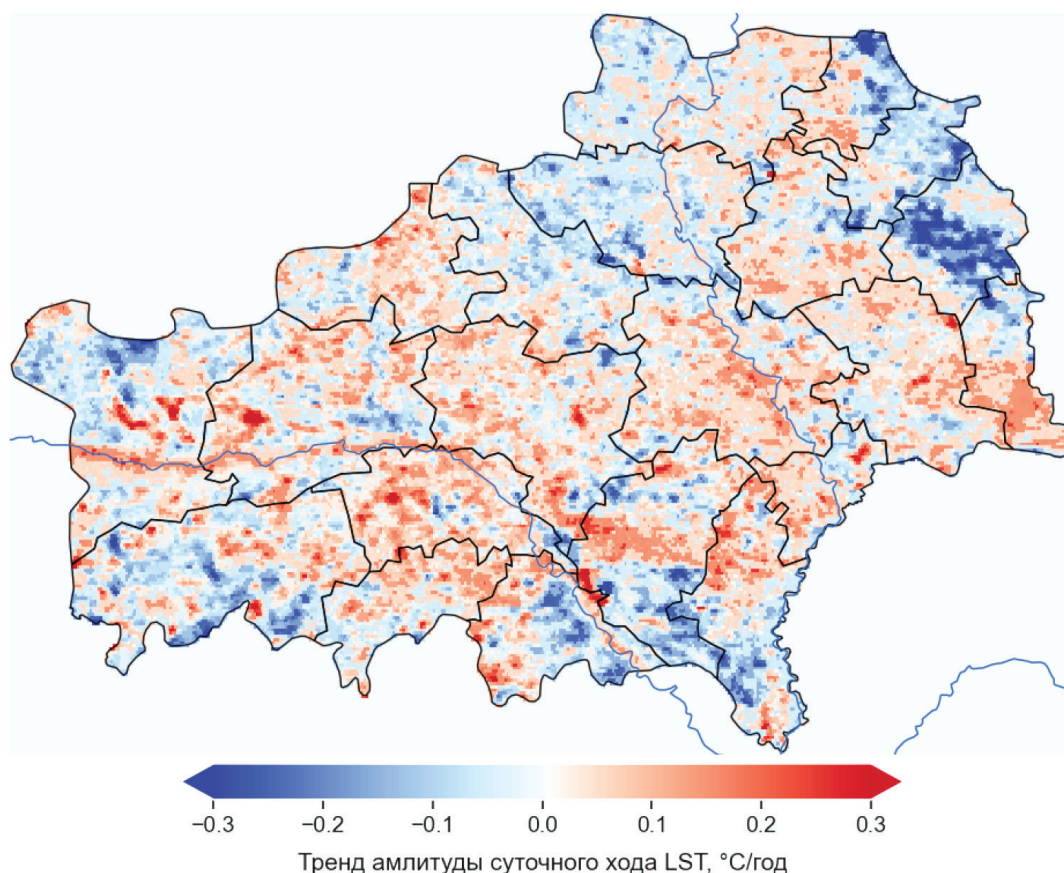


Рис. 8. Коэффициент линейного тренда средней для вегетационного периода амплитуды суточных колебаний температуры подстилающей поверхности

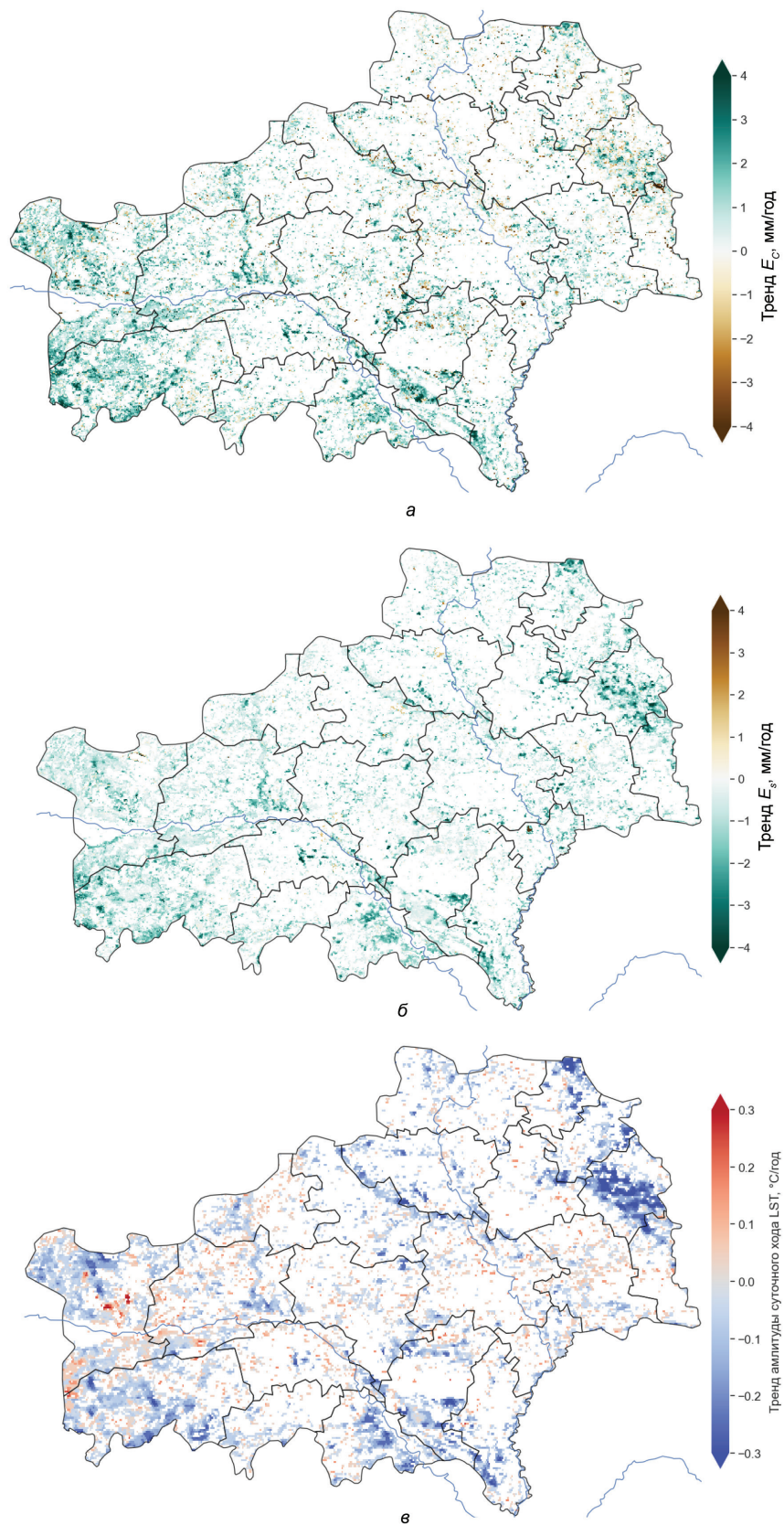


Рис. 9. Коэффициенты линейного тренда транспирации растительности (а), испарения с поверхности почвы (б) и амплитуды суточного цикла температуры (в) для земель Гомельской обл. со статистически достоверным ($p < 0,01$) положительным трендом вегетационного индекса NDVI

С целью оценки возможностей смягчения для лесного и сельского хозяйства региона негативных последствий изменения климата рассмотрим отдельно оценки трендов биоклиматических показателей земель, на которых за период 2000–2023 гг. произошло статистически достоверное ($p < 0,01$) увеличение вегетационного индекса NDVI. Такие оценки предоставляют ценную информацию о том, насколько эффективно мероприятия по увеличению лесистости и созданию защитных лесополос способны повлиять на микроклимат и водный баланс в регионе.

Распределение коэффициентов линейных трендов испарения с почвы, транспирации растительности и амплитуды суточного цикла температуры подстилающей поверхности на землях Гомельской обл. со статистически достоверным ($p < 0,01$) положительным трендом NDVI представлено на рис. 9. Видно, что увеличение лесистости и растительного покрова приводит к увеличению транспирации растений в среднем на 0,81 мм/год (рис. 9, а), к уменьшению испарения с почвы в среднем на 0,73 мм/год (рис. 9, б) и уменьшению внутрисуточных колебаний температуры поверхности в среднем на 0,04 °C/год (рис. 9, в), что эквивалентно тренду 0,024 °C/год для температуры воздуха [20]).

Для пахотных земель с положительным трендом NDVI связаны уменьшение испарения с почвы в среднем на 1,18 мм/год и увеличение транспирации в среднем на 0,79 мм/год. Это говорит о том, что в результате создания защитных лесонасаждений и использования покровных растений суммарное испарение влаги в атмосферу уменьшится, а значит, больше влаги будет оставаться в почве и использоваться растениями для транспирации и терморегулирования. При этом микроклимат станет более умеренным – уменьшатся суточные перепады температур, сократятся вероятности теплового стресса и заморозков для растений.

Таким образом, внедрение и использование на регулярной основе методов агролесоводства (устойчивой системы земледелия, сочетающей использование водоохраных и почвозащитных функций древесной растительности с агрономическими мерами), несомненно, будут способствовать обеспечению сельскохозяйственных культур необходимой почвенной влагой и противодействовать аномальному росту температуры почвы в летний период за счет повышения возможностей ее эвапотранспирационного регулирования.

Выводы. Рассчитанные значения индекса аридности для территории Гомельской обл. Беларуси за 2000–2022 гг. показывают, что в вегетационный период данный регион по международной классификации FAO относится к семиаридной зоне (потенциальное испарение в мае – июне превышает сумму атмосферных осадков более чем на 50 %).

Современное изменение климата на территории Гомельской обл. лучше всего согласуется с расчетами глобальных климатических моделей для одного из самых жестких сценариев антропогенного радиационного воздействия – SSP3–7.0 (рост среднегодовой глобальной температуры к концу столетия +4 °C по сравнению с доиндустриальным периодом). В данном сценарии ожидается рост средней температуры в Гомельской обл. в теплый период года на 3,3 °C уже к середине текущего столетия при почти неизменной сумме атмосферных осадков.

Влияние усиления засушливости климата на биоклиматические показатели и водный баланс земель Гомельской обл. исследованы на основе данных ДЗЗ. Показано, в период 2000–2023 гг. вегетационный индекс NDVI, характеризующий фотосинтетически активную биомассу, уменьшался на 64 % площади Гомельской обл., что свидетельствует о снижении биологической продуктивности земель в результате изменения климата. Транспирация растительности на землях сельскохозяйственного назначения преимущественно уменьшается – в среднем на 0,50 мм/год, что делает растения более уязвимыми перед волнами тепла и засухами. Одновременно с этим на 53 % общей площади пахотных земель Гомельской обл. отмечается положительный тренд испарения с почвы в вегетационный период – в среднем 0,19 мм/год.

Анализ изменений температуры и составляющих суммарного испарения на землях Гомельской обл. со статистически достоверным ($p < 0,01$) положительным трендом вегетационного индекса NDVI показал, что увеличение лесистости (за счет создания защитных лесополос и выращивания покровных растений) способно обеспечить снижение испарения с почвы на землях сельскохозяйственного назначения в среднем на 1,2 мм/год и увеличить транспирацию растений на 0,8 мм/год, что создаст положительный баланс почвенной влаги и повысит возможности естественной терморегуляции растений. Положительным фактором увеличения лесистости является и уменьшение внутрисуточных колебаний температуры, что снизит риски теплового стресса и заморозков для растений.

За счет экологической реабилитации земель также возможно повысить экосистемный нетто-сток CO₂, что будет важным шагом на пути выполнения Республикой Беларусь обязательств по сокращению выбросов парниковых газов в соответствии с Парижским соглашением Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке БРФФИ (грант № Х23КУБ-010).

Список использованных источников

1. Лысенко, С. А. Особенности современного изменения климата в Республике Беларусь / С. А. Лысенко, И. В. Буяков // *Фундам. и приклад. климатология*. – 2020. – № 3. – С. 22–41.
2. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск: Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
3. Шкляр, А. Х. Климатические ресурсы Белоруссии и их использование в сельском хозяйстве / А. Х. Шкляр. – Минск: Выш. шк., 1973. – 430 с.
4. Изменения климата Беларуси и их последствия / В. Ф. Логинов [и др.]. – Минск: Тонпик, 2003. – 330 с.
5. Шебеко, В. Ф. Влияние осушительных мероприятий на водный режим территорий / В. Ф. Шебеко. – Минск: Ураджай, 1983. – 200 с.
6. Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов [и др.] // *Изв. РАН. Сер. геогр.* – 2021. – Т. 85, № 4. – С. 515–527.
7. Лысенко, С. А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси / С. А. Лысенко // *Исслед. Земли из космоса*. – 2019. – № 6. – С. 77–88.
8. Лысенко, С. А. Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье / С. А. Лысенко, В. Ф. Логинов, П. О. Зайко // *Метеорология и гидрология*. – 2022. – Т. 47, № 1. – С. 59–71.
9. Лысенко, С. А. Сеточный архив метеорологических данных 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. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) / R. Allen [et al.]. – Rome: FAO, 1998. – 333 p.
11. Biophysical applications of satellite remote sensing / J. M. Hanes [et al.]. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 230 p.
12. PML_V2 0.1.7: Coupled evapotranspiration and gross primary product [Electronic resource]. – Available at: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CAS_IGSNRR_PML_V2_v017(accessed 1 December 2021).
13. Penman, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass / H. L. Penman // *Proc. R. Soc. London, Ser. A*. – 1948. – Vol. 193. – P. 120–145.
14. Monteith, J. Evaporation and environment / J. Monteith // *19th Symposia of the Soc. for Experimental Biol.* – 1965. – Vol. 19. – P. 205–234.
15. A simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation / R. Leuning [et al.] // *Water Resour. Res.* – 2008. – Vol. 44. – W10419. <https://doi.org/10.1029/2007WR006562>
16. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components / Y. Q. Zhang [et al.] // *Sci. Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 19124. <https://doi.org/10.1038/srep19124>
17. Use of satellite leaf area index estimating evapotranspiration and gross assimilation for Australian ecosystems / R. Gan [et al.] // *Ecohydrology*. – 2018. – Vol. 11. – e1974. <https://doi.org/10.1002/eco.1974>
18. Coupled estimation of 500-m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002–2017 / Y. Zhang [et al.] // *Remote Sens. Envir.* – 2019. – Vol. 222. – P. 165–182.
19. Gilbert, R. O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring* / R. O. Gilbert. – New York: Wiley, 1987. – 336 p.
20. Лысенко, С. А. Прямые и обратные связи между температурой подстилающей поверхности и листовым индексом на территории Беларуси в летний период / С. А. Лысенко // *Исслед. Земли из космоса*. – 2023. – № 1. – С. 1–16.

Поступила 04.04.2024