

ПРИРОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКА ГЕОСИСТЕМ

УДК 551.583:58.056:591.543(476)

ПРИЗНАКИ АРИДИЗАЦИИ КЛИМАТА И ИХ ЭКОСИСТЕМНЫЕ
ПРОЯВЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

© 2021 г. В. Ф. Логинов^а, С. А. Лысенко^а, В. С. Хомич^{а, *}, В. П. Семенченко^б,
А. В. Кулак^б, И. М. Степанович^с

^аИнститут природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

^бНаучно-практический центр НАН Беларуси по биоресурсам, Минск, Беларусь

^сИнститут экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси, Минск, Беларусь

*e-mail: valery_khomich@mail.ru

Поступила в редакцию 01.09.2020 г.

После доработки 20.04.2021 г.

Принята к публикации 27.04.2021 г.

Представлены результаты исследований изменений агрометеорологических условий на территории Беларуси в последние десятилетия и их влияние на состояние растительности и животного мира. Показано, что изолиния годовой суммы активных суточных температур, превышающих 10°C, продвигается с юга на север Беларуси со средней скоростью около 12 км/год. Северная граница продолжительности периода вегетации с начала современного потепления сместилась к северу Беларуси примерно на 280 км, а средняя продолжительность вегетации увеличилась на 12 дней. Рост температуры воздуха и испарения при практически неизменном годовом количестве атмосферных осадков обуславливает усиление засушливости климата Беларуси. Средняя для Беларуси годовая сумма эффективных осадков (за вычетом потенциального испарения) понижается со скоростью около 6 мм/год, а граница нулевого баланса между осадками и потенциальным испарением продвигается на север Беларуси со средней скоростью 19 км/год. Статистический анализ связи листового индекса (LAI) с метеорологическими параметрами для теплого периода года показывает, что в настоящее время главным фактором, лимитирующим рост биопродуктивности экосистем на территории Беларуси, является количество атмосферных осадков. Современные изменения климата не способствуют росту биологической продуктивности обрабатываемых земель в южной и центральной частях Беларуси (ниже широты Минска), листовая индекс которых понижается со скоростью до 2% за год. Смещение агроклиматических зон и усиление засушливости климата привели к экспансии на территорию Беларуси степных видов растений и животных различного систематического положения, а также к изменениям во флоре и фауне водоемов и водотоков.

Ключевые слова: изменение климата, агроклиматические зоны, биопродуктивность экосистем, биологическое разнообразие, ксерофитизация растительных сообществ, инвазии степных видов животных

DOI: 10.31857/S2587556621040063

ВВЕДЕНИЕ

Современное потепление климата уменьшает температурную разницу между сезонами и температурный контраст между северными и южными широтами. В результате уменьшается продолжительность зимнего периода, общее количество тепла, доступное для растений, а агрометеорологические зоны продвигаются с юга на север (Bjorkman et al., 2018; Xu et al., 2013). В наземных экосистемах умеренных и субарктических широт по мере роста температуры воздуха увеличивается доля теплолюбивых и засухоустойчивых растений, а бореальные виды угнетаются и отступают на север (Rustad, 2012; Soudzilovskaia, 2013; Xu et al., 2013).

Увеличение продолжительности вегетационного периода и рост содержания углекислого газа в атмосфере положительно сказываются на продуктивности растительного покрова в глобальном масштабе, что подтверждают данные спутниковых наблюдений листового индекса и наземной биомассы для последних десятилетий (Chen et al., 2019; Liu et al., 2015; Zhu et al., 2016). Однако во многих регионах планеты рост биологической продуктивности наземных экосистем сдерживается негативными последствиями изменения климата, такими как увеличение частоты и продолжительности жарких периодов с дефицитом осадков, возникновение засух и лесных пожаров, нарушение гидрологического режима почв и др.

(Babst et al., 2019; Heimann, Reichstein, 2008; Xu et al., 2013). Расчеты глобальных климатических моделей последнего поколения (CMIP5), несмотря на большую неопределенность их проекций будущего климата, показывают статистически значимое усиление атмосферных и почвенных засух в текущем столетии при всех сценариях эмиссии парниковых газов (Lu et al., 2019; Marvel et al., 2019; Swann et al., 2016), что может иметь крайне негативные последствия для природы многих регионов.

На территории Беларуси в последние десятилетия наблюдается быстрое смещение агроклиматических зон в северном направлении и формирование на юге страны климатических условий, характерных для лесостепной зоны Украины и России (Логинов и др., 2020). Среднегодовая температура воздуха в Беларуси с 1976 по 2019 г. возрастала со скоростью $0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$, что втрое превышало среднюю по планете скорость потепления. При этом годовая сумма атмосферных осадков за период потепления не претерпела существенных изменений, способных компенсировать увеличение испарения. В результате на территории республики, и особенно в ее южных регионах с легкими песчаными почвами, начали проявляться признаки аридизации климата, представляющие серьезную проблему для лесного и сельского хозяйства. По данным реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5, среднее для Беларуси значение индекса аридности, определяемого как отношение годовой суммы осадков к потенциальной испаряемости, с 1979 по 2019 г. уменьшилось примерно на 30%. Среднее значение индекса аридности для Гомельской области в настоящее время составляет около 0.8, что соответствует превышению потенциального испарения над осадками на 20%. Участвовавшие в последние годы засухи и длительные волны тепла приводят к ухудшению влагообеспеченности почв, обмелению рек, систематическому понижению уровня грунтовых вод, увеличению заболеваемости лесных культур и массовому поражению хвойных лесов жуком-короедом (Логинов и др., 2020; Лысенко, Логинов, 2020).

В настоящей статье представлены результаты анализа изменений агрометеорологических характеристик на территории Беларуси в последние десятилетия и оценки их последствий для продуктивности и видового разнообразия растительного и животного мира.

В первой части статьи дается описание современных агрометеорологических условий на территории Беларуси (расположения агроклиматических зон, продолжительности вегетационного периода, водного баланса) и их изменений за пе-

риод потепления. Вторая часть содержит оценки влияния изменений климата на продуктивность растительных сообществ, характеризуемую их листовым индексом. В третьей части статьи рассматриваются изменения флоры и фауны в Беларуси за период современного потепления.

ИЗМЕНЕНИЕ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

Агроклиматические зоны Беларуси, традиционно определяемые по годовой сумме активных температур выше 10°C , за прошедший период потепления претерпели значительные изменения. Еще недавно считалось, что в Беларуси из трех агроклиматических зон, существовавших до начала потепления – Северной, Центральной и Южной (Шкляр, 1973), осталось только две, а на юге формируется новая зона с суммой активных температур от 2600 до 2800°C (Мельник и др., 2018). Однако данные последних 20 лет показывают (рис. 1), что новая агроклиматическая зона к настоящему времени продвинулась выше широты Минска, охватив половину Минской, Гродненской и Могилевской областей. “Северная” агроклиматическая зона полностью ушла с территории Беларуси, а от “центральной” зоны остались два небольших участка на севере республики. При этом на юге годовая сумма активных температур уже превышает 2800°C , что свидетельствует о формировании еще одной агроклиматической зоны.

Средняя для Беларуси годовая сумма активных температур с 1976 по 2019 г. возросла на 590°C и в настоящее время составляет 2420°C на севере и 2980°C на юге, уменьшаясь на 126°C с каждым градусом северной широты. В результате глобального потепления изолинии годовой суммы активных температур продвигаются с юга на север со скоростью около $12\text{ км}/\text{год}$. При сохранении этой тенденции в последующие 30 лет на всей территории Беларуси могут быть абсолютно новые агроклиматические условия с суммой активных температур не ниже 2900°C , характерные для лесостепной зоны Украины в период, предшествующий современному потеплению климата.

Быстрому продвижению агроклиматических зон с юга на север Беларуси способствует как рост температуры воздуха, так и увеличение продолжительности вегетационного периода. Его средняя продолжительность, определяемая по датам устойчивого перехода среднесуточной температуры весной и осенью через $+5^{\circ}\text{C}$, в последние 20 лет составила 159 дней на севере и 179 дней на юге Беларуси, тогда как в базовый климатический период 1961–1990 гг. этот диапазон был 149 и 165 дней соответственно (рис. 2). Северная граница начала вегетации в период современного

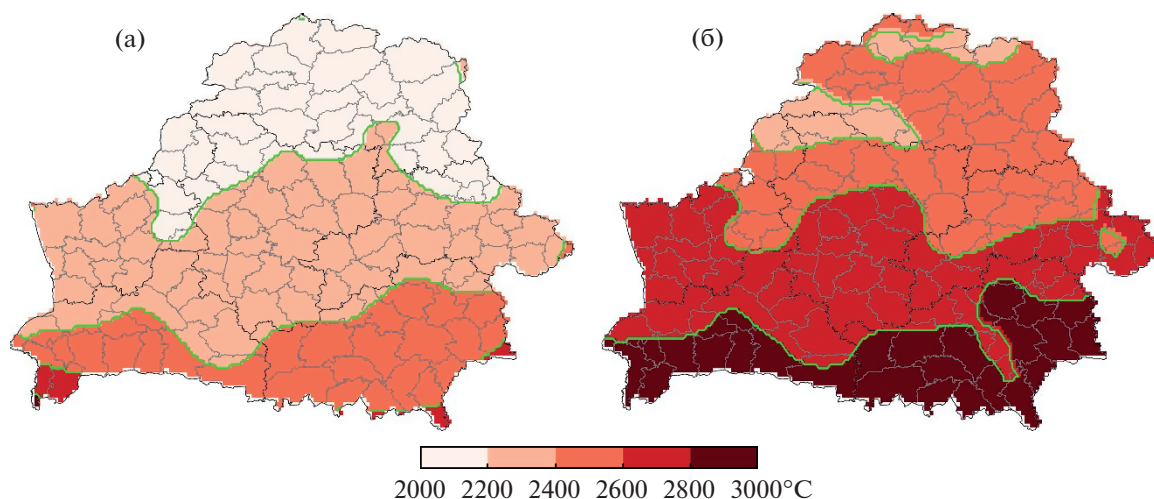


Рис. 1. Распределение годовых сумм активных температур ($^{\circ}\text{C}$) на территории Беларуси в 1961–1990 гг. (а) и 2000–2019 гг. (б).

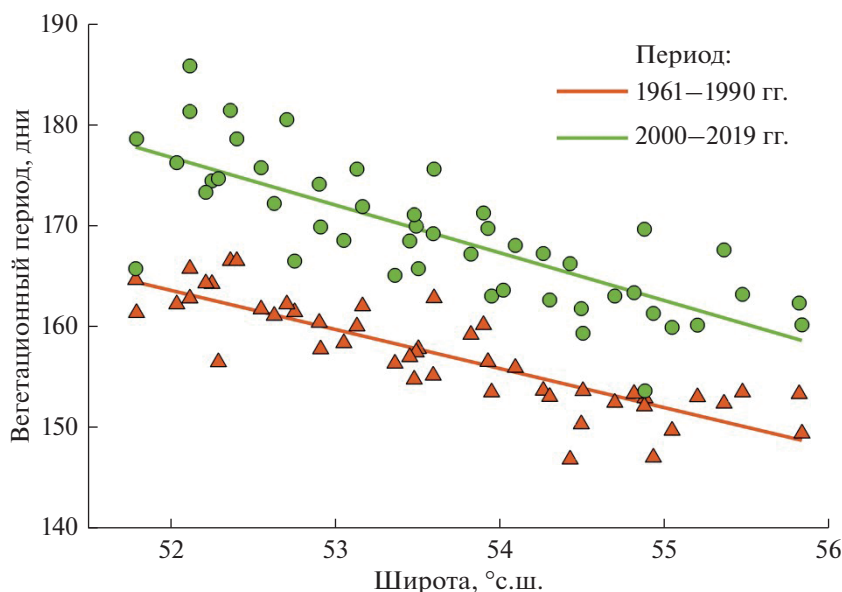


Рис. 2. Широтные зависимости продолжительности вегетационного периода в Беларуси, рассчитанные по суточным данным по приземной температуре воздуха за 1961–1990 и 2000–2019 гг.

Примечание: Символы — станционные данные, прямые — аппроксимации.

потепления сместилась к северу Беларуси примерно на 280 км, а продолжительность вегетации увеличилась на 12 дней.

Наблюдаемые тенденции потепления климата в целом улучшают агрометеорологические условия на севере Беларуси, где главным сдерживающим фактором развития земледелия раньше были низкие температуры воздуха. Однако в регионе Белорусского Полесья, подвергнувшегося в 1960–80-х годах осушительной мелиорации, степень благоприятности новых агрометеорологических условий во

многом определяется доступной и продуктивной почвенной влагой.

За рассматриваемый период сумма атмосферных осадков в вегетационный период на территории Беларуси не претерпела существенных изменений. В июне, когда происходит наиболее активная вегетация, их количество даже уменьшается (примерно с 1980 г.). В июле наблюдается тенденция увеличения доли ливневых осадков на юге Беларуси, которые малоэффективны для пополнения запасов почвенной влаги. Кроме того, частые и

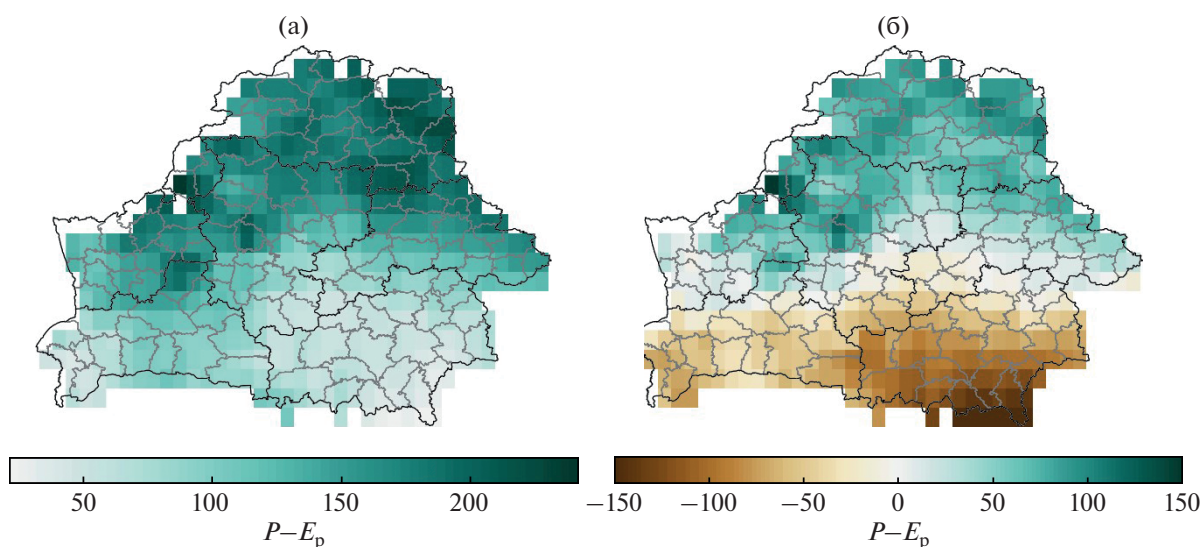


Рис. 3. Разность годовых сумм атмосферных осадков (P) и потенциального испарения (E_p), рассчитанная по данным реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5 для периодов 1980–1999 гг. (а) и 2000–2019 гг. (б).

продолжительные зимние оттепели не способствуют накоплению снежного покрова и хорошему увлажнению почв ранней весной, в результате чего почвенные засухи в последние годы стали возникать в самом начале вегетационного периода.

О тенденциях в условиях влагообеспеченности территории Беларуси, складывающихся в результате изменения климата, можно судить по разностям годовых сумм осадков и потенциального испарения (испаряемости) для двух периодов: 1980–1999 и 2000–2019 гг. (рис. 3). До 2000 г. годовое количество осадков превышало годовую испаряемость на всей территории Беларуси, причем в северных регионах это превышение доходило до 300 мм. За период 2000–2019 гг. соотношение между осадками и испаряемостью поменялось кардинальным образом: в настоящее время отрицательный баланс наблюдается на всей территории Брестской и Гомельской областей, нулевой баланс — на юге Гродненской, Минской и Могилевской областей, а максимальное значение этого баланса в остальной части страны не превышает 150 мм. Такое снижение водного баланса, очевидно, вызвано быстрым потеплением воздуха, а вместе с этим и влагоемкости атмосферы при отсутствии роста количества атмосферных осадков.

Изменение увлажненности территории Беларуси в современный период характеризуется уменьшением разницы годовых сумм осадков и испаряемости со средней скоростью около 6 мм/год и продвижением на север границы нулевого баланса осадков и испаряемости со скоростью 19 км/год.

КЛИМАТОГЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЛИСТОВОГО ИНДЕКСА

Для количественной характеристики фотосинтетически активной надземной биомассы на больших территориях удобно использовать листовой индекс подстилающей поверхности (Leaf Area Index, LAI), измеряемый со многих спутниковых платформ (Baret, Buis, 2008; Ganguly et al., 2014). В статье используются данные по листовому индексу для Беларуси спутникового радиометра MODIS за 2000–2019 гг. (Myneni et al., 2015).

На основе исходных 8-дневных композиционных карт LAI с пространственным разрешением 500 м формировались среднесезонные (с мая по сентябрь) карты LAI с равномерной сеткой по широте и долготе местности $0.05^\circ \times 0.05^\circ$. На такую же сетку интерполировались среднесезонные данные по трем основным метеорологическим параметрам, влияющим на фотосинтез: температура воздуха (T), количество осадков (P) и поток солнечной радиации на нижней границе атмосферы (S). По первым двум параметрам использовались стационарные наблюдения на территории Беларуси (Лысенко и др., 2019), по солнечной радиации — данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA5.

Отметим, что при сезонном усреднении метеорологических параметров P и S они проявляют высокую степень взаимосвязи, обусловлено их обоюдной зависимостью от облачности. Этот факт приводит к ложному (отрицательному) знаку коэффициента парной корреляции между LAI и S , поскольку увеличение солнечной радиации

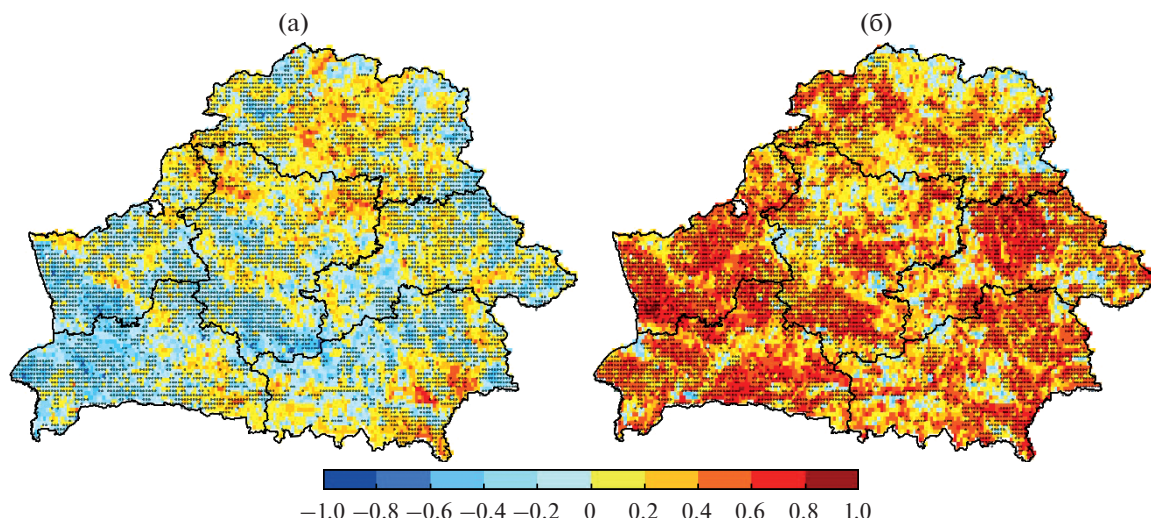


Рис. 4. Коэффициенты корреляции LAI со средней температурой воздуха (а) и количеством осадков (б) с мая по август.
Примечание. Точками обозначены посевные площади.

при пониженной облачности сопровождается уменьшением выпадения атмосферных осадков. Это негативно сказывается на состоянии растительности. Поэтому связь LAI с S имеет смысл рассматривать только во множественной регрессии наряду с другими метеорологическими параметрами.

О зависимости LAI от средней температуры и количества осадков с мая по сентябрь можно судить по картам коэффициентов парной корреляции, представленным на рис. 4. Для исключения возможности возникновения ложных корреляций из всех рассматриваемых величин вычитался линейный тренд и рассматривались только их межгодовые вариации относительно линии тренда.

Зависимость LAI от средней температуры воздуха в вегетационный период проявляется слабо, а для посевных площадей имеет отрицательный знак (рис. 4а). Это говорит о том, что в настоящее время средние тепловые ресурсы территории Беларуси не только не ограничивают развитие земледелия, но даже избыточны, а *превышение средних значений температуры не приводит к повышению продуктивности агроценозов.*

Из рассматриваемых метеорологических параметров наиболее значимую связь с LAI имеет количество атмосферных осадков (рис. 4б). Эта связь является положительной практически для всей территории Беларуси, а для посевных площадей межгодовые вариации объясняют свыше 40% общей дисперсии временного ряда LAI (за вычетом тренда). Таким образом, в современный период главным фактором, лимитирующим рост

биопроductивности экосистем, является количество атмосферных осадков, необходимых для пополнения запасов продуктивной влаги.

Теперь рассмотрим долгосрочные тенденции в изменениях биопроductивности экосистем под влиянием климатических факторов. Для этой цели строились множественные линейные регрессии между межгодовыми вариациями LAI и метеорологических параметров. Межгодовые вариации всех анализируемых величин отсчитывались относительно их трендов, что позволило в значительной степени исключить из рассмотрения не связанные с климатом факторы долгосрочных изменений LAI, такие как рост интенсивности фотосинтеза с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере, естественное зарастание заброшенных территорий, изменения в структуре землепользования и др.

Для вычисления трендов метеорологических величин использовался период 1979–2019 гг., первый год которого соответствует началу потепления в Беларуси и в целом в северном полушарии. Линейный тренд LAI вычислялся для периода, охватываемого данными MODIS (2000–2019 гг.).

Коэффициенты уравнения множественной линейной регрессии для LAI, где независимыми переменными выступают температура воздуха, осадки и солнечная радиация, позволяют оценить чувствительность LAI к каждому из этих метеорологических параметров. Далее, зная коэффициенты линейных трендов метеорологических параметров и чувствительности к ним LAI, несложно рассчитать линейный тренд LAI, обу-

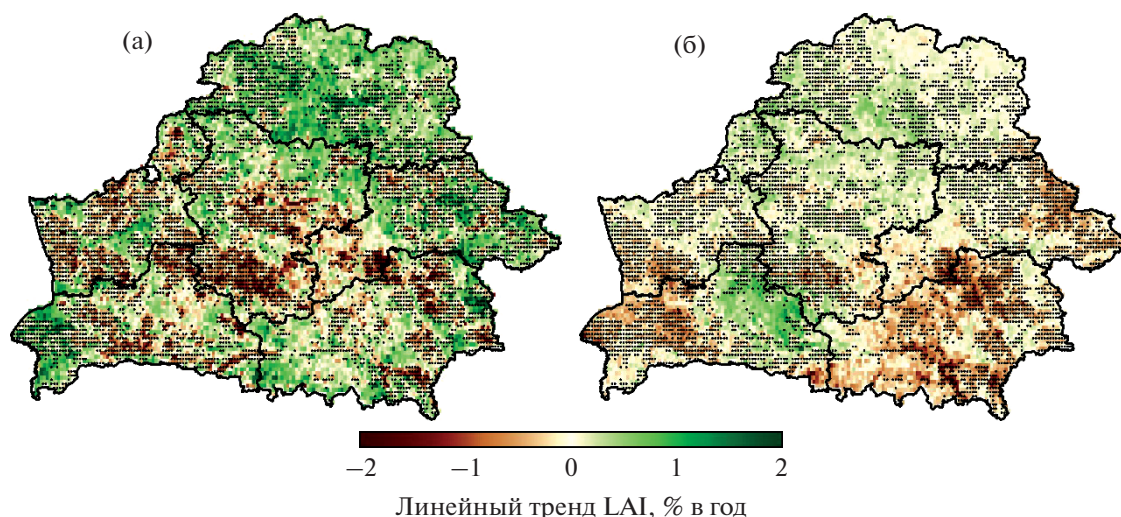


Рис. 5. Линейный тренд LAI (а) и его климатобусловленная составляющая (б).
Примечание. Точками обозначены посевные площади.

словленный долгосрочными изменениями параметров, т.е. климатобусловленный тренд.

Фактический и климатобусловленный тренды LAI рассчитывались для всей территории Беларуси с разрешением 0.05° . Пространственное распределение коэффициентов этих трендов сопоставлено на рис. 5. Видно, что листовой индекс посевных площадей, обозначенных на картах точками, уменьшается со скоростью до 2% за год практически на всей территории, за исключением некоторых районов Витебской области. Это свидетельствует об ухудшении агрометеорологических условий для традиционных культур республики. В то же время листовой индекс лесных массивов и необрабатываемых земель Беларуси возрастает, что связано с повышением уровня углекислого газа в атмосфере и с зарастанием залежей.

Из представленного на рис. 5б распределения тренда LAI видно, что в южной части Беларуси (ниже широты Минска) современные изменения климата отрицательно сказываются на продуктивности растительности. Это особенно заметно для Гомельской области, где происходит наибольший рост летней температуры воздуха при практически неизменяющемся количестве летних осадков. Из рис. 5б видно, что от изменения климата на юге Беларуси страдают не только пахотные земли, но и многие лесные массивы. Так, согласно данным Глобального мониторинга лесов¹, в Гомельской области лишь за последние четыре года потери лесного покрова (без учета новых лесонасаждений) составили 106 тыс. га, или

примерно 5.4% от его общей площади в 2010 г. Исключением являются лесные массивы на северо-востоке Брестской области, где благодаря большому количеству болот поддерживается благоприятный гидрологический режим почв.

На севере Минской области и во всей Витебской области современные изменения климата благоприятствуют росту биологической продуктивности местных экосистем. Скорость роста летних температур здесь примерно на четверть ниже, чем на юге Беларуси, а проблемы засух успешно нивелируются высокой влагоудерживающей способностью преобладающих в регионе суглинистых и глинистых почв.

Таким образом, быстрый рост температуры воздуха и преобладание годовой испаряемости над осадками на юге Беларуси уже проявляется в снижении продуктивности местных растительных сообществ, не приспособленных к новым климатическим условиям. В то же время на территории Беларуси увеличивается присутствие новых видов растений из лесостепной зоны Украины. В связи с этим рассмотрим изменения видового разнообразия представителей растительного и животного мира за период современного потепления в Беларуси.

ИЗМЕНЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО И ЖИВОТНОГО МИРА БЕЛАРУСИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА

Положение Беларуси в центре европейского континента представляет собой арену активного взаимопроникновения неморальной (широко-

¹ Global Forest Watch. <https://gfw.global/39noH42/> (дата обращения 28.03.2021).

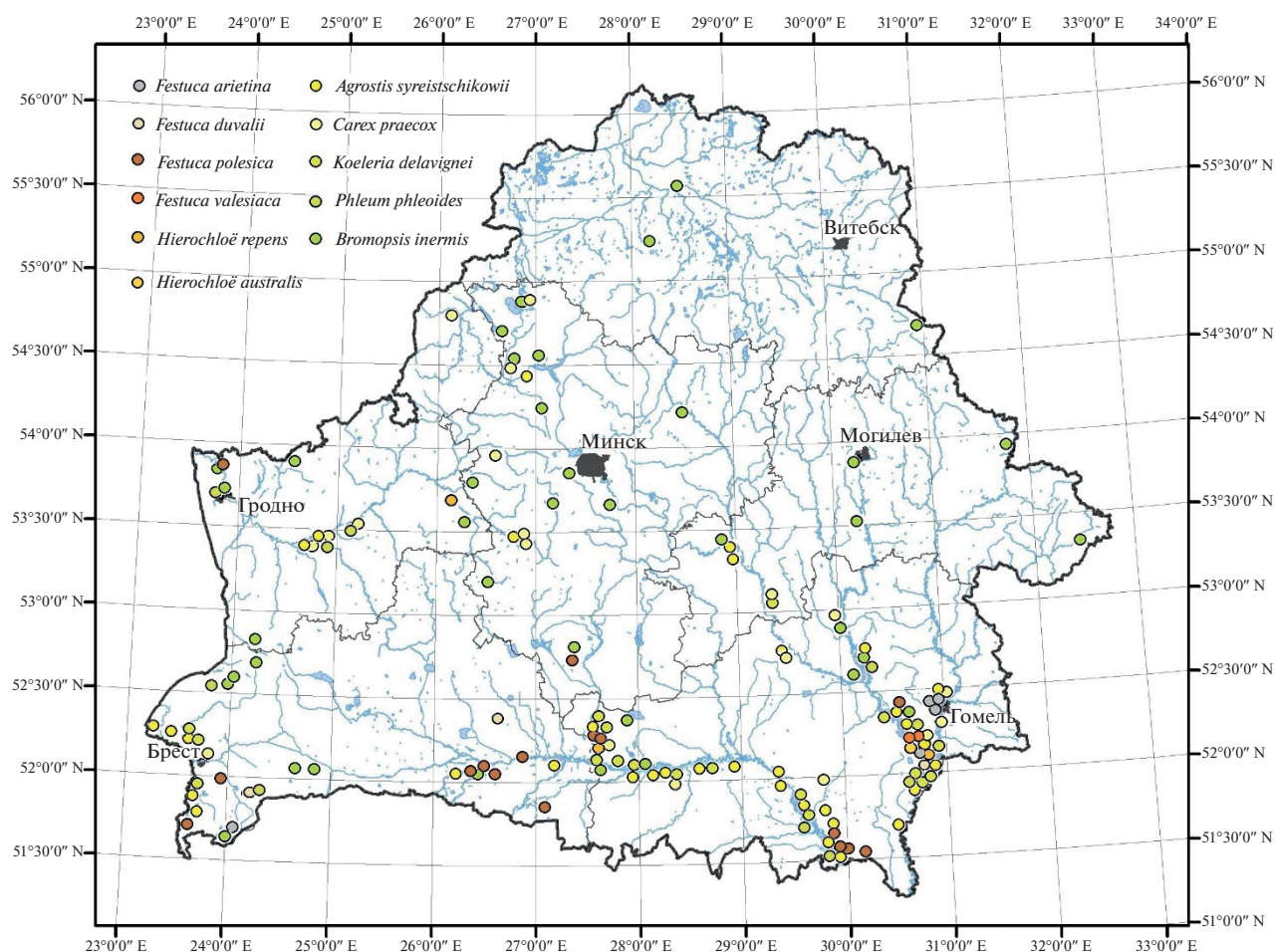


Рис. 6. Распространение сообществ *Festuco-Brometea* с доминированием ксеротермных растений.

лиственных лесов) и бореальной (таежной) растительности. Под влиянием масштабного осушения территории и на фоне глобального потепления наблюдается активизация теплолюбивых и засухоустойчивых растений. Бореальные виды (ель европейская) и аркто-бореальные (водяника, морошка) угнетаются и отступают на север. Представители флоры степей и субтропиков, наоборот, присутствуют во всех экосистемах страны, включая водные (речные и озерные) и агроэкосистемы. В природных экосистемах (луговых, лесных) наиболее активны ксеротермные и псаммофильные травы, формирующие целые сообщества (Сцепанович, 1997).

В синтаксономической структуре растительности ксеротермные сообщества отнесены к трем классам европейской системы: 1. *Festuco-Brometea* (*erecti*) — остепненные (ксеротермные) луговые сообщества, 2. *Trifolio-Geranietea sanguinei* — ксеротермные сообщества лесных опушек и 3. *Rhamno-Prunetea* — сообщества ксеротермных кустар-

ников. Первый класс представлен 7 ассоциациями, второй — 3, третий — 2 (Сцепанович, 2006).

На картосхеме (рис. 6) показано распространение остепненных травяных сообществ наиболее представительного класса *Festuco-Brometea* с доминированием 11 характерных видов. Остепненные травяные сообщества с доминированием овсяниц (*Festuca arietina*, *F. duvalii*, *F. valesiaca*), зубровки ползучей (*Hierochloë repens*) и келерии (*Koeleria delavignei*) встречаются исключительно на юге страны. В абсолютном большинстве к Южной геоботанической подзоне приурочены сообщества овсяницы полесской (*Festuca polesica*). Здесь наиболее характерны травостой с господством полевицы (*Agrostis syreistschikowii*) и тимфеевки степной (*Phleum phleoides*). Они формируются также в западной части Центральной геоботанической подзоны — в поймах Немана и Вилии. И самые широко распространенные (заходят в Северную геоботаническую подзону) — сообщества осоки ранней (*Carex praecox*) и кост-

реца безостого (*Bromopsis inermis*). Фитоценозы с участием зубровки южной (*Hierochloë australis*) встречаются в центральной части Беларуси. За исключением кострцевого (ассоциации *Bromopsidetum inermis*) все ксеротермные сообщества произрастают в юго-западной части страны по линии Гомель — Минск — Вильнюс, где преобладают почвы легкого гранулометрического состава и мягче климат.

Сообщества класса *Festuco-Brometea*, как правило, приурочены к вершинам и хорошо прогреваемым склонам высоких прирусловых грив и надпойменных террас крупных и низовий средних рек, а также южной экспозиции склонов холмов. Причем в низовьях междуречий концентрация травянистых ксерофитов наибольшая, потому что здесь больше гумусированного и аэрированного аллювия и слабая конкуренция со стороны древесно-кустарниковой растительности.

Наши наблюдения за последние около 40 лет свидетельствуют о заметной ксерофитизации состава сухолюбивых сообществ других классов растительности. Так, в классе *Molinio-Arrhenatheretea* — сообщества настоящих (эумезофильных) и сырых лугов — фитоценологами выделен союз *Trifolion montani*, представленный в Беларуси тремя ассоциациями с обилием эвтрофных (люцерн серповидной и хмелевидной) и мезотрофных (мятлика узколистного, земляники зеленой, клевера горного, подмаренников мягкого и настоящего, подорожника среднего, душицы обыкновенной и др.) ксеромезофитов. В классе *Artemisietea vulgaris* — травяные сообщества залежей и нарушенных земель — группу сообществ с господством эвтрофных ксеромезофитов (донников белого и лекарственного, моркови дикой, пижмы обыкновенной) представляет союз *Dauco-Melilotion* (Сцепанович, 2006). Сообщества данного союза распространены без очевидной закономерности по всей территории страны. При этом такие ценозообразователи, как донники белый (*Melilotus albus*) и лекарственный (*M. officinalis*) — инвазионные виды, и их активность возрастает.

Остепнение, или ксерофитизация, проявляется как в увеличении присутствия засухоустойчивых и теплолюбивых травянистых видов — представителей европейско-малоазиатского и евросибирско-аралокаспийского биотических комплексов, — так и в значительном (средний показатель 1.4 раза) расширении общей площади ксеротермных травяных и формировании некоторых лесных и древесно-кустарниковых сообществ в естественных условиях (Пугачевский и др., 2011). Среди травянистой растительности наиболее заметную реакцию на изменения температурного режима и влажности среды проявляют сообщества с доминирова-

нием осоки ранней (асс. *Allio-Caricetum praecocis*) и клевера среднего (асс. *Trifolietum medii*), площади которых увеличились местами втрое за счет вытеснения эвмезофильных (типично луговых), других ксеромезофильных (остепненных), а также психромезофильных (обедненных) травяных фитоценозов.

В светлых лесах, на опушках и среди кустарников по высоким берегам рек в основном южной части Беларуси активно распространяется адвентивный боярышник (*Crataegus curvisepala*). Общее повышение температуры и сухость воздуха способствуют распространению в поймах р. Западный Буг и других рек средиземноморских терновников (*Prunus spinosa*). Еще недавно их можно было встретить на высоких прирусловых валах поймы Западного Буга. Теперь они встречаются севернее — в нижнем течении р. Березины (в Светлогорском районе Гомельской области).

Среди древесных ксерофитов все активнее заявляют о себе инвазионные виды — робиния лежачая (*Robinia pseudoacacia*) и клен ясенелистный (*Acer negundo*), местами претендующие на доминирование в фитоценозах. Так, наибольшие площади они занимают на юге Беларуси, а в Полесском радиационно-экологическом заповеднике (Гомельская область) на селитебных землях робиния формирует монодоминантные сообщества.

В отношении растительности изменение климата проявляется двояко: положительно — при достаточной влажности почво-грунтов стимулируется развитие фитомассы, что способствует распространению популяций и сообществ ценных в кормовом отношении видов (бекманный обыкновенный, люцерны хмелевидной, мятлика узколистного, тонконога Делявина, полевицы Сырейщикова и др.); и негативную — при дефиците влаги угнетается и изреживается травостой, из него выпадают ценные злаки и бобовые, усиливается эрозия почв, повышается вероятность внедрения в аборигенные фитоценозы инвазионных видов, в том числе опасных для человека (например, амброзии полынолистной) и природных экосистем.

Таким образом, наибольшим видовым и фитоценотическим разнообразием ксеротермной растительности характеризуется Южная геоботаническая подзона Беларуси, особенно ее юго-восточная часть (Добрушский, Гомельский, Лоевский и другие районы), расположенная в 100 км от украинских степей. Здесь количество атмосферных осадков в сравнении с Белорусским Поозерьем (Северная геоботаническая подзона) меньше на 200 мм в год. В связи с дефицитом влаги в период активной вегетации и повышенным температур-

ным фоном в растительных сообществах происходят как количественные, так и качественные изменения: обилия засухоустойчивых видов и площади, занятой их популяциями, видового состава флоры, структуры и продуктивности надземной фитомассы, которая, как правило, снижается.

В результате потепления и усиления засушливости климата в Беларуси произошли значительные изменения и в животном мире. Поскольку любой вид животных необходимо рассматривать не как изолированную независимую единицу, а в составе экосистемы, где он занимает определенную экологическую нишу, то становится понятным, что выпадение аборигенных и/или появление новых видов в результате потепления климата может вызывать ряд перестроек экосистемных процессов, и, наоборот, изменения в экосистеме будут сказываться на состоянии популяций видов.

Формирование новых агроклиматических зон в Беларуси, которые можно охарактеризовать как “лесостепные”, привело к изменению в видовом составе и численности представителей фауны: появлению степных видов и снижению численности (а иногда и исчезновению) других видов, в основном бореальных.

Таким образом, потепление и усиление засушливости, создающие агроклиматические условия близкие к степным, могут приводить и уже приводят к изменениям в распространении видов, утрате местообитаний, изменениям в трофических цепях, интенсификации инвазионных процессов, увеличению скорости вымирания редких и уязвимых видов.

Хорошо известно, что изменения климата обычно тесно связаны с изменением увлажненности территорий. Быстрое потепление и усиление засушливости южных регионов Беларуси вынуждает популяции одних видов смещаться в более увлажненные и прохладные широты, а других (например, степных) — продвигаться на север.

Среди позвоночных животных, которые появились на юге Беларуси, отметим интродуцированную лошадь Пржевальского (*Equus przewalskii caballus*), золотистого шакала (*Canis aureus*), орла степного (*Aquila nipalensis*), суслика крапчатого (*Spermophilus suslicus*), кольчатую горлицу (*Streptopelia decaocto*), сирийского дятла (*Dendrocopos syriacus*), тиркушку степную (*Glareola nordmanni*).

Появился и целый ряд новых (южных) видов насекомых. Так, на юге Беларуси отмечены тарантул (*Lycosa singoriensis*), богомол (*Mantis religiosa*), саранча (*Locusta migratoria*), роющие осы (*Sceliphron destillatorium* и *S. Curvatum*). Расширяют свой ареал степной иксодовый клещ (*Dermatocen-*

ter marginatus), обыкновенная хлебная жужелица (*Zabrus tenebrioides*).

С конца XX в. на юге Беларуси обнаружены некоторые виды чешуекрылых насекомых более южного происхождения. На территории соседней Украины они обитают главным образом в лесостепи и степи, на территории Польши — в основном в южных воеводствах. Это совка медная (*Chersotis cuprea*), ленточница пестрая (*Grammodes stolidus*), совка капюшонница (*Cucullia pustulata*), пяденица толстолобая (*Therapis flavicaria*) и др. Кроме того, вследствие теплых зим, отмечено проникновение чужеродных североамериканских насекомых: ложнощитовка туевая (*Parthenolecanium fletcheri*), белоакациевая моль (*Phylloborycter robiniella*) и др.

В последнее время все чаще наблюдается низкий весенний уровень воды в реках южной части Беларуси, что ведет к потере нерестилищ для рыб, размножающихся на залитых водой речных поймах. Увеличение среднегодовой температуры и снижение поступления талых вод в реки и водохранилища, привело к возрастанию минерализации воды. Так, в р. Припяти за последние 20 лет она возросла в два раза. Это способствовало проникновению чужеродной понто-каспийской фауны (Никифоров, Семенченко, 2011). Ряд понто-каспийских водных беспозвоночных, а также черноморских бычков распространились на всем протяжении р. Припяти (Semenchenko, Rizevskiy, 2017). На некоторых участках реки они составляют от 20 до 40% в общей численности макрозообентоса и ихтиофауны. Данное явление известно как биологическое загрязнение экосистем и представляет опасность для аборигенной фауны.

Типичным примером изменений в трофической цепи является массовое развитие сине-зеленых водорослей, вызывающее в летнее время “цветение” воды в озерах. Пусковым механизмом размножения этих планктонных организмов является высокая летняя и осенняя температура. Установлено, что для большинства видов пресноводных сине-зеленых водорослей температурный оптимум — около 30°C. Например, для широко распространенного вида *Microcystis aeruginosa* он составляет +32°C. Такие или близкие к ним высокие летние температуры воды все чаще наблюдаются в мелководных озерах и водохранилищах на юге Беларуси (Никифоров, Семенченко, 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты свидетельствуют о наметившейся тенденции усиления засушливости климата, вызванной быстрым ростом температуры воздуха и испарения при практически неизменной годовой сумме атмосферных осадков

Беларуси. В ее южных регионах эти изменения климата существенным образом отражаются на продуктивности и разнообразии растительного и животного мира.

Границы агроклиматических областей Беларуси продвигаются в северном направлении со скоростью около 12 км/год. При сохранении этой тенденции уже через 30 лет на территории республики сформируются новые агроклиматические условия с суммой активных температур не ниже 2900°C, характерные для лесостепной зоны.

Одновременно с ростом температуры воздуха происходит уменьшение уровня увлажненности территории страны. Средняя разница между годовым количеством осадков и испаряемостью уменьшается со скоростью примерно 6 мм/год, а граница нулевого баланса между осадками и испаряемостью продвигается с юга на север Беларуси со средней скоростью 19 км/год. В настоящее время годовая испаряемость превалирует над осадками практически на всей территории Брестской и Гомельской областей.

Рост продолжительности и теплообеспеченности вегетационного периода в целом улучшают агрометеорологические условия на севере Беларуси, где до начала современного потепления главным фактором, ограничивающим развитие земледелия, считался недостаток тепла. В настоящее время средние тепловые ресурсы территории Беларуси не только не ограничивают развитие земледелия, но даже избыточны. Отрицательная корреляция межгодовых вариаций листового индекса и температуры воздуха для посевных площадей Беларуси указывает на то, что дальнейшее повышение теплообеспеченности вегетационного периода без принятия необходимых мер в сельском хозяйстве уже не приведет к повышению биологической и хозяйственной продуктивности агроценозов.

Главным фактором, лимитирующим рост продуктивности агроценозов на территории страны, является количество атмосферных осадков, которым объясняется свыше 40% межгодовой изменчивости листового индекса посевных площадей. В южной части Беларуси (ниже широты Минска) быстрый рост температуры воздуха и уменьшение количества эффективных осадков (за вычетом испарения) обуславливают отрицательный тренд продуктивности не только агроценозов, но и многих природных экосистем (лесов и древесно-кустарниковой растительности), о чем говорят отрицательные значения климатообусловленного тренда их листового индекса (в отдельных районах до 2% за год). Исключение составляет северо-восток Брестской области, где высока доля болот.

Усиление засушливости климата на юге Беларуси, с одной стороны, сопровождается снижением продуктивности аборигенной растительности, не приспособленной к новым климатическим условиям, с другой — распространением новых видов растений степной и лесостепной зон различных жизненных форм, особенно ксеротермных трав и полукустарничков, расширением занимаемых ими местообитаний, что свидетельствует о процессах остепнения. Наблюдается корреляционная связь активности ксеротермных видов и растительных сообществ с распределением среднегодовых сумм активных температур и количеством атмосферных осадков. Климатические факторы являются одними из определяющих в современном развитии флоры и формировании фитоценозов. Однако определяющим фактором в современной динамике растительного покрова остается хозяйственная деятельность человека.

Формирование в южной части Беларуси агроклиматических условий, близких к лесостепным и степным, сопровождается изменениями в распространении различных видов животных, утрате местообитаний, изменениями в трофических цепях, интенсификацией инвазионных процессов, увеличением скорости вымирания редких и уязвимых видов. Аридизация вынудила популяции некоторых аборигенных видов животных смещаться в более увлажненные и прохладные широты (снизилась численность лесного хорька и горностая, практически исчезла белая куропатка и др.). Одновременно в результате потепления и усиления засушливости климата на территорию Беларуси расширился ареал степных видов животных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Мельник В.И. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования. 2-е изд. Минск: УП “Энциклопедикс”, 2020. 264 с.
- Лысенко С.А., Логинов В.Ф. Роль лесов в поддержании водного баланса на территории Беларуси // Докл. НАН Беларуси. 2020. Т. 64. № 2. С. 225–232.
- Лысенко С.А., Чернышев В.Д., Коляда В.В. Сеточный архив метеорологических данных Республики Беларусь и возможности его применения для исследования пространственно-временных особенностей изменений климата // Природопользование. 2019. № 1. С. 17–27.
- Мельник В.И., Данилович И.С., Кулешова И.Ю., Комаровская Е.В., Мельчакова Н.В. Оценка агроклиматических ресурсов территории Беларуси за период с 1989 по 2015 г. // Природные ресурсы. 2018. № 2. С. 88–101.

- Никифоров М., Семенченко В. Биоразнообразие в теплом мире // Наука и инновации. 2011. № 4 (98). С. 17–20.
- Пукачевский А., Степанович И., Ермохин М. Растительность в новых природных условиях // Наука и инновации. 2011. № 4 (98). С. 21–24.
- Сцепа́нович І.М. Ксератэ́рмныя (астэ́паваныя) лугавыя супольні́цтвы Белару́сі // Весці АН Белару́сі. Сер. біял. навук. 1997. № 2. С. 12–20.
- Сцепа́нович Я.М. Фіта́цэна́разна́стайна́сць раслі́ннасці Белару́сі // Ботаника: Исследования. 2006. Вып. XXXIV. С. 264–281.
- Шкляр А.Х. Климатические ресурсы Белоруссии и использование их в сельском хозяйстве. Минск: Вышэйшая школа, 1973. 432 с.
- Babst F., Bouriaud O., Poulter B., Trouet V., Girardin M.P., Frank D.C. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth // Sci. Adv. 2019. Vol. 5. № 1. eaat4313.
- Baret F., Buis S. Estimating Canopy Characteristics from Remote Sensing Observations: Review of Methods and Associated Problems // Adv. in Land Rem. Sens./ S. Liang (ed.). Dordrecht: Springer, 2008. P. 173–201.
- Bjorkman A.D., Myers-Smith I.H., Elmendorf S.C. et al. Plant functional trait change across a warming tundra biome // Nature. 2018. Vol. 562. P. 57–62.
- Chen C., Park T., Wang X., Piao Sh., Xu B., Chaturvedi R.K., Fuchs R., Brovkin V., Ciais Ph., Fensholt R., Tommervik H., Bala G., Zhu Z., Nemani R.R., Myneni R.B. China and India lead in greening of the world through land-use management // Nat. Sustain. 2019. Vol. 2. P. 122–129.
- Ganguly S., Nemani R.R., Baret F. Green Leaf Area and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation // Biophys. Applications of Satellite Rem. Sens. / J.M. Hanes (ed.). Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. P. 43–61.
- Heimann M., Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // Nature. 2008. Vol. 451. P. 289–292.
- Liu Y.Y., van Dijk A.I.J.M., de Jeu R.A.M., Canadell J.G., McCabe M.F., Evans J.P., Wang G. Recent reversal in loss of global terrestrial biomass // Nat. Clim. Change. 2015. Vol. 5. P. 470–474.
- Lu J., Carbone G.J., Grego J.M. Uncertainty and hotspots in 21st century projections of agricultural drought from CMIP5 models // Sci. Rep. 2019. Vol. 9. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41196-z>
- Marvel K., Cook B.I., Bonfils C.J.W., Durack P.J., Smerdon J.E., Williams A.P. Twentieth century hydroclimate changes consistent with human influence // Nature. 2019. Vol. 569. P. 59–65.
- Myneni R., Knyazikhin Y., Park T. MOD15A2H MODIS Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2015.
- Rustad L.R., Campbell J., Dukes J.S., Huntington T., Fallon L.K., Mohan J., Rodenhouse N. Changing climate, changing forests: the impacts of climate change on forests of the northeastern United States and eastern Canada. Newtown Square, PA: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 2012.
- Semenchenko V.P., Rizevskiy V.K. Alien Species of Invertebrates and Fish in River Ecosystem of Belarus: Distribution, Biological Contamination, and Impact // Hydrobiol J. 2017. Vol. 53. № 1. P. 26–40.
- Soudzilovskaia N.A. Functional Traits Predict Relationship Between Plant Abundance Dynamic and Long-Term Climate Warming // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2013. V. 110. № 45. P. 18180–18184.
- Swann A.L.S., Hoffman F.M., Koven C.D., Randerson J.T. Plant responses to increasing CO₂ reduce estimates of climate impacts on drought severity // PNAS. 2016. Vol. 113. № 36. P. 10019–10024.
- Xu L., Myneni R.B., Chapin III F.S., Callaghan T.V. et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // Nat. Clim. Change. 2013. № 3. P. 581–586.
- Zhu Z., Piao Sh., Myneni R.B., Huang M. et al. Greening of the Earth and its drivers // Nat. Clim. Change. 2016. Vol. 6. P. 791–795.

Climate Aridization Signs and Their Ecosystem Displays on the Territory of Belarus

V. F. Loginov¹, S. A. Lysenko¹, V. S. Khomich¹*, V. P. Semchenko²,
A. V. Kulak², and I. M. Stepanovich³

¹Institute of Nature Management of the NASB, Minsk, Belarus

²Scientific and Practical Center for Bioresources of the NASB, Minsk, Belarus

³Kuprevich Institute of Experimental Botany of the NASB, Minsk, Belarus

*e-mail: valery_khomich@mail.ru

The results of studies of changes in agrometeorological characteristics on the territory of Belarus in recent decades and their impact on the state of flora and fauna of the country are presented. It is shown that the isoline of the annual sum of active daily temperatures exceeding 10°C moves from the south to the north of the country at an average speed of about 12 km per year. The northern boundary of the growing season duration since the beginning of the period of modern warming has shifted to the north of Belarus by about 280 km and the average growing season duration has increased by 12 days. An increase in air temperature and evaporation

with an almost unchanged annual amount of precipitation causes an increase in the aridity of the climate of Belarus. The average annual effective precipitation (excluding potential evaporation) decreases at a rate of about 6 mm/year and the zero balance between precipitation and potential evaporation moves to the north of Belarus at an average speed of 19 km per year. Statistical analysis of the relationship between the leaf area index (LAI) and meteorological parameters for the warm season shows that at present time the main factor limiting the growth of ecosystems' biological productivity in Belarus is the precipitation amount. Modern climate changes do not contribute to an increase of the cultivated land biological productivity in the southern and central parts of Belarus (below the latitude of Minsk), the LAI here is decreasing at a rate of up to 2% per year. The displacement of agroclimatic zones and the increased climate aridity have led to the expansion of steppe plant and animal species of various taxonomic groups to the territory of Belarus as well as to changes in the aquatic flora and fauna.

Keywords: climate change, agro-climatic zones, ecosystem productivity, biological diversity, plant communities xerophytization, steppe animal species invasion

REFERENCES

- Babst F., Bouriaud O., Poulter B., Trouet V., Girardin M.P., Frank D.C. Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Sci. Adv.*, 2019, vol. 5, no. 1, eaat4313. doi 10.1126/sciadv.aat4313
- Baret F., Buis S. Estimating canopy characteristics from remote sensing observations: Review of methods and associated problems. In *Advances in Land Remote Sensing*. Liang S., Ed. Dordrecht: Springer, 2008, pp. 173–201. doi 10.1007/978-1-4020-6450-0_7
- Bjorkman A.D., Myers-Smith I.H., Elmendorf S.C. et al. Plant functional trait change across a warming tundra biome. *Nature*, 2018, vol. 562, pp. 57–62.
- Chen C., Park T., Wang X., Piao Sh., Xu B., Chaturvedi R.K., Fuchs R., Brovkin V., Ciais Ph., Fensholt R., Tommervik H., Bala G., Zhu Z., Nemani R.R., Myneni R.B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat. Sustain.*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 122–129.
- Ganguly S., Nemani R.R., Baret F. Green leaf area and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation. In *Biophysical Applications of Satellite Remote Sensing*. Hanes J., Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014, pp. 43–61. doi 10.1007/978-3-642-25047-7_2
- Heimann M., Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*, 2008, vol. 451, pp. 289–292.
- Liu Y.Y., van Dijk A.I.J.M., de Jeu R.A.M., Canadell J.G., McCabe M.F., Evans J.P., Wang G. Recent reversal in loss of global terrestrial biomass. *Nat. Clim. Change*, 2015, vol. 5, pp. 470–474.
- Loginov V.F., Lysenko S.A., Mel'nik V.I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate Change in Belarus: Causes, Consequences, Regulation Possibilities]. Minsk: Entsiklopediks Publ., 2020, 2nd ed. 264 p.
- Lu J., Carbone G.J., Grego J.M. Uncertainty and hotspots in 21st century projections of agricultural drought from CMIP5 models. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, 4922. doi 10.1038/s41598-019-41196-z
- Lysenko S.A., Chernyshev V.D., Kolyada V.V. Grid archive of meteorological data of the Republic of Belarus and the possibility for its application for the study of spatial and temporal features of climate change. *Prirodopol'zovanie*, 2019, no. 1, pp. 17–27. (In Russ.).
- Lysenko S.A., Loginov V.F. The role of forests in maintaining water balance in Belarus. *Dokl. Natsional'noi Akad. Nauk Belarusi*, 2020, vol. 64, no. 2, pp. 225–232. (In Russ.).
- Marvel K., Cook B.I., Bonfils C.J.W., Durack P.J., Smerdon J.E., Williams A.P. Twentieth century hydroclimatic changes consistent with human influence. *Nature*, 2019, vol. 569, pp. 59–65.
- Melnik V.I., Danilovich I.S., Kuliashova I.Y., Komarovskaya A.V., Melchakova N.V. Assessment of the agroclimatic resources of the territory of Belarus for the period 1989–2015. *Prir. Resur.*, 2018, no. 2, pp. 88–101. (In Russ.).
- Myneni R., Knyazikhin Y., Park T. *MOD15A2H MODIS Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015. doi 10.5067/MODIS/MCD15A2H.006
- Nikiforov M., Semenchchenko V. Biodiversity in the warming world. *Nauka i Innovatsii*, 2011, no. 4 (98), pp. 17–20. (In Russ.).
- Pugachevskii A., Stepanovich I., Ermokhin M. Vegetation to the new environmental conditions. *Nauka i Innovatsii*, 2011, no. 4 (98), pp. 21–24. (In Russ.).
- Rustad L.R., Campbell J., Dukes J.S., Huntington T., Fallon L.K., Mohan J., Rodenhouse N. *Changing Climate, Changing Forests: The Impacts of Climate Change on Forests of the Northeastern United States and Eastern Canada*. Gen. Tech. Rep. NRS-99. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, 2012. 48 p.
- Semenchenko V.P., Rizevskiy V.K. Alien species of invertebrates and fish in river ecosystem of Belarus: Distribution, biological contamination and impact. *Hydrobiol. J.*, 2017, vol. 53, no. 1, pp. 26–40.
- Shklyar A.Kh. *Klimaticheskie resursy Belorussii i ispol'zovanie ikh v sel'skom khozyaistve* [Climatic Resources of Belarus and Their Use in Agriculture]. Minsk: Vysheishaya Shkola 1973. 432 p.
- Soudzilovskaia N.A. Functional traits predict relationship between plant abundance dynamic and long-term cli-

- mate warming. *PNAS*, 2013, vol. 110, no. 45, pp. 18180–18184.
- Stsepanovich I.M. Xerodermia (estephania) meadow communities in Belarus. *Vesci NAN Belarusi. Ser. Bijal. Navuk*, 1997, no. 2, pp. 12–20. (In Belarus).
- Stsepanovich Ya.M. The diversity of plant communities vegetation in Belarus. *Botanika: Issled.*, 2006, no. 34, pp. 264–281. (In Belarus.).
- Swann A.L.S., Hoffman F.M., Koven C.D., Randerson J.T. Plant responses to increasing CO₂ reduce estimates of climate impacts on drought severity. *PNAS*, 2016, vol. 113, no. 36, pp. 10019–10024.
- Xu L., Myneni R.B., Chapin F.S. et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands. *Nat. Clim. Change*, 2013, no. 3, pp. 581–586.
- Zhu Z., Piao Sh., Myneni R.B. et al. Greening of the Earth and its drivers. *Nat. Clim. Change*, 2016, vol. 6, pp. 791–795.