

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ПРЯМЫЕ И ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ И ЛИСТОВЫМ ИНДЕКСОМ НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

© 2023 г. С. А. Лысенко*

Государственное научное учреждение “Институт природопользования НАН Беларуси”, Минск, Беларусь

*E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Поступила в редакцию 01.09.2022 г.

С использованием данных дистанционного зондирования Земли за 2000–2020 гг. получены количественные оценки влияния процессов деградации растительного покрова на скорость летнего потепления в Беларуси. Средний листовой индекс Беларуси за рассматриваемый период увеличился на 3.3%, главным образом за счет лесных массивов, для которых его увеличение составило около 8%. Рост листового индекса примерно вдвое замедлил летнее потепление лесных земель на севере (выше 54° с.ш.) и более чем на четверть – на юге Беларуси. Одновременно с этим листовым индексом пахотных земель снизился примерно на 5%, что вызвало их дополнительное потепление и усилило внутрисуточные колебания температуры подстилающей поверхности в летний период. Показано, что ряд территорий Беларуси общей площадью около 400 тыс. га имеют статистически достоверные признаки биоклиматической деградации, которые усиливаются высокими значениями положительной обратной связи между температурой, растительным покровом и почвенной влагой. Среди земель с признаками биоклиматической деградации 58% – это земли сельскохозяйственного назначения, расположенные преимущественно в южной части страны. На этих землях летнее потепление происходит в 2 раза быстрее чем в среднем по стране, а их листовой индекс понижается со скоростью около 2% за год, что указывает на недостаточность мер по адаптации сельского хозяйства к изменению климата, предпринимаемых в отдельных районах Беларуси.

Ключевые слова: изменение климата, деградация земель, листовой индекс, температура подстилающей поверхности, обратные связи

DOI: 10.31857/S0205961423010074, **EDN:** MMXAKY

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы изменения биологической продуктивности наземных экосистем и деградации земель в результате глобального потепления в последние годы активно обсуждаются в научной литературе и ежегодно отражаются в международных и национальных докладах по климатической повестке (Shukla et al. 2019; Национальный доклад, 2019; Burrell et al., 2020). Если в целом для планеты отчетливо отмечается тенденция “глобального озеленения”, связанная главным образом с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере (CO₂ как удобрение) и естественным зарастанием многих заброшенных земель (Liu et al., 2015; Zhu et al., 2016; Chen et al., 2019; Rasul et al., 2020), то на региональном уровне негативные последствия изменения климата (увеличение частоты экстремальных погодных явлений, возрастание риска возникновения лесных пожаров, ухудшение гидрологического режима почв и др.) могут нивелировать в целом положительный биосферный эффект CO₂ (Shukla et al. 2019; Burrell et al., 2020; Jiao

et al. 2021; Liu et al., 2021; Duffy et al., 2021; Lesk et al., 2021). В свою очередь потеря или сокращение растительного покрова приводят к существенным изменениям радиационного и турбулентного теплообмена между атмосферой и подстилающей поверхностью, что сопровождается изменениями температуры воздуха, скорости ветра, облачности и осадков (Золотокрылин, 2003; Heilmann, Reichstein, 2008; Xu et al., 2013; Green et al., 2017; Babst et al., 2019; Zhang et al., 2022). Помимо этого, при своде растительности (например, в результате урбанизации и развития сельского хозяйства) существенным образом изменяется соотношение между атмосферным, поверхностным и внутрипочвенным стоками дождевых и талых вод, что часто проявляется на региональном уровне в уменьшении увлажненности почвы и понижении уровня грунтовых вод (Рахманов, 1984; Воронков, 1988).

Известно, что с ростом температуры увеличивается дефицит влажности воздуха и потенциальное испарение (испаряемость), в результате чего в

регионах, где потепление сопровождается незначительным изменением атмосферных осадков или даже их уменьшением, происходит систематическое иссушение почвы и повышается риск возникновения засух. К таким регионам в настоящее время можно отнести юго-восточную часть Беларуси, где преобладают легкие песчаные и супесчаные почвы, не способные эффективно удерживать влагу. Среднее для Беларуси значение индекса аридности, определяемого как отношение годовой суммы осадков к потенциальному испарению, с 1979 по 2020 г. уменьшилось на 30% и в современный период составляет примерно 0,8, что соответствует превышению потенциального испарения над осадками на 20%. В современный период годовая испаряемость превалирует над осадками практически на всей территории Брестской и Гомельской областей Беларуси (Логинов и др., 2020).

Особенно уязвимым перед изменениями климата оказалось Белорусское Полесье, которое в 1960–1970-е гг. подверглось ширококомасштабной осушительной мелиорации с целью вовлечения заболоченных земель в сельскохозяйственный оборот. Последующее интенсивное использование осушенных торфяно-болотных почв под пашню привело к быстрой потере ими торфяного горизонта и выходу на поверхность подстилающих песков. Помимо этого, в результате мелиорации произошло существенное понижение уровня грунтовых вод и обмеление малых рек на прилегающих к болотам землях. Климат мелиорированных территорий в целом стал более экстремальным: увеличилась продолжительность и интенсивность засух и заморозков, повторяемость зим с низкими температурами и малой высотой снежного покрова, повысилась продолжительность периодов с высокой температурой воздуха и т.д. (Логинов, 2008).

Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем Беларуси подробно исследовано в работах (Лысенко, 2019; Логинов и др., 2021; Лысенко и др., 2022). Показано, что в современный период главным фактором, ограничивающим рост биопродуктивности наземных экосистем Беларуси, является количество атмосферных осадков. Территория Полесья по своим биоклиматическим характеристикам в настоящее время относится к зоне с избыточными для местных биогеоценозов ресурсами тепла и солнечной радиации, но недостаточными ресурсами влаги. Рост температуры и усиление засушливости климата в этом регионе оказывают крайне негативное влияние на биопродуктивность местных экосистем, приводя к потерям запасов в них углерода со скоростью около 750000 т/год (Лысенко и др., 2022). 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 (Логинов и др., 2021).

Обратные связи структуры землепользования и температуры воздуха изучались в работах (Горный и др., 2022; Шинкаренко и др., 2020, Шинкаренко и др., 2021) на примерах различных муниципальных образований Северной Евразии. В отмеченных работах было подробно исследовано влияние площади различных типов подстилающей поверхности и их вегетационных индексов на температуру воздуха, рассчитаны соответствующие коэффициенты корреляции и их сезонный ход, что в целом дает понимание важной роли растительного покрова подстилающей поверхности в наблюдаемых изменениях климата на региональном уровне.

В настоящей статье представлены результаты исследований обратных связей долгопериодных изменений температуры подстилающей поверхности (LST, Land Surface Temperature) и листового индекса (LAI, Leaf Area Index) на территории Беларуси. На основе данных дистанционного зондирования Земли проанализированы тренды LST и LAI для различных типов подстилающей поверхности и получены оценки регионального потепления, связанного с деградацией почвенно-растительного покрова. Выявлены закономерности долгопериодных изменений дневной и ночной температур, а также амплитуды суточного хода LST для лесных массивов и земель сельскохозяйственного назначения. Выделены регионы с высоким уровнем значимости трендов LST и LAI и наиболее сильным проявлением положительных обратных связей между ними.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы для проведения исследования использовались информационные продукты LST (MOD11A2) и LAI (MCD15A2H) спутникового спектрометра MODIS, имеющего достаточно длинный ряд наблюдений (с 2000 г.) и сравнительно высокое качество данных (Duan et al., 2019; Fang et al., 2021). Исходные данные MODIS представлены в виде 8-дневных композитных карт с пространственным разрешением 1 км для LST и 0,5 км для LAI. Оба информационных продукта MODIS для удобства их сопоставления приведены к единому пространственному разрешению 1 км и осреднены за летние месяцы каждого года.

На основе агрегированных для летнего периода карт MODIS рассчитаны пространственные распределения коэффициентов линейных трендов LST и LAI, характеризующих период с 2000 по 2020 гг. Статистическая достоверность трендов

оценивалась по стандартному двустороннему тесту Стьюдента при выбранном уровне значимости p .

Для классификации подстилающей поверхности использовалась глобальная схема классификации растительности IGBP, также основанная на данных прибора MODIS – база данных MODIS Land Cover Type (Friedl et al., 2010). Она включает 17 классов подстилающей поверхности, из которых 11 классов естественной растительности, 3 антропогенных и мозаичных земельных класса и 3 класса не относящихся к растительности. Современная пространственная структура ландшафтов Беларуси согласно данным MODIS Land Cover Type представлена семью типами подстилающей поверхности: ENF – вечнозеленые хвойные леса, DBF – листопадные широколиственные леса, MF – смешенные леса, GRA – луга, CRO – пашни, WSA – лесостепи, SAV – степи. В категорию “лесостепи” попадают низинные болота с преимущественно древесно-кустарниковой растительностью и многие заброшенные территории, которые в настоящее время подвергаются облесению (например, выработанные торфяники и зоны вырубki леса). К категории “степи” относятся пойменные луга, а также заброшенные сельскохозяйственные земли, на которых облесение пока что не началось.

Статистический анализ прямых и обратных связей между LST и LAI для каждого типа подстилающей поверхности проводился с учетом административно-территориального деления Беларуси, включающего 118 административных единиц базового уровня (районов). Для каждого типа подстилающей поверхности, встречающегося в пределах каждого района, строились регрессионные зависимости между LST и LAI, на основе которых оценивалась чувствительность LST к LAI. С использованием установленных зависимостей рассчитывалось изменение температуры подстилающей поверхности, вызванное изменением листового индекса за период с 2000 по 2020 гг., и, таким образом, количественно оценивалась роль деградации растительного покрова в летнем потеплении на территории Беларуси.

ИЗМЕНЕНИЕ БИОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗА ПЕРИОД С 2000 ПО 2020 ГОДЫ

Карты изменений листового индекса, а также температуры подстилающей поверхности (дневной, ночной и амплитуды ее суточного хода), построенные для территории Беларуси на основе коэффициентов линейных трендов LST и LAI за 2000–2020 гг., приведены на рис. 1.

Анализ пространственного распределения тренда LAI показывает, что листовый индекс для территории Беларуси за 2000–2020 гг. в среднем увеличился на 3.3%, главным образом за счет лесных массивов, для которых среднее увеличение LAI составило около 8%. Стоит отметить, что рост LAI в последние десятилетия отмечается не только в Беларуси, но и в глобальных масштабах, что во многом связано с ростом концентрации CO₂ в атмосфере (Liu et al., 2015; Zhu et al., 2016; Chen et al., 2019; Rasul et al., 2020). В тоже время для земель Беларуси, относящихся к категории пахотных, листовый индекс за отмеченные годы снизился примерно на 5%, что также имеет объяснение с учетом наблюдаемого усиления засушливости климата Беларуси и недостаточно быстрого реагирования на него сельскохозяйственных технологий.

В целом рост LAI отмечается на 64% общей площади Беларуси. На 17.5% площади Беларуси рост LAI является статистически достоверным при уровне значимости $p = 0.05$. Доля земель со статистически значимым понижением LAI составляет лишь 5%.

Для лесных массивов рост LAI наблюдается примерно на 84.5% их общей площади, причем на 25% их площади рост LAI можно считать статистически значимым ($p = 0.05$). Статистически достоверное снижение LAI отмечается всего лишь для 0.7% общей площади лесных массивов.

Для пахотных земель ситуация с изменением LAI обратная: отрицательным трендом LAI охвачено примерно 63% их общей площади, а статистически значимым отрицательным трендом – 11.5%. Доля пахотных земель со статистически значимым ростом LAI составляет менее 4%.

Стоит отметить, что в современный период территорию Беларуси по своим биоклиматическим характеристикам можно условно разделить на две принципиально различающиеся зоны: северную (выше 54° с.ш.) и южную (ниже 54° с.ш.) (Лысенко и др., 2022). В северной зоне рост продуктивности наземных экосистем пока еще сдерживается недостатком среднегодового количества тепла, а южная зона, напротив, характеризуется избытком тепла, но недостатком влаги для местных биогеоценозов. Негативное влияние изменений климата на агроценозы наиболее сильно проявляется в южной биоклиматической зоне Беларуси: листовый индекс пахотных земель за 2000–2020 гг. здесь уменьшился в среднем на 6.6%, тогда как в северной зоне он практически не изменился (+0.02%). Изменения листового индекса лесных земель в отмеченных биоклиматических зонах Беларуси не демонстрируют столь существенных различий: +9.3% в северной зоне и +7.0% южной, что свидетельствует о гораздо

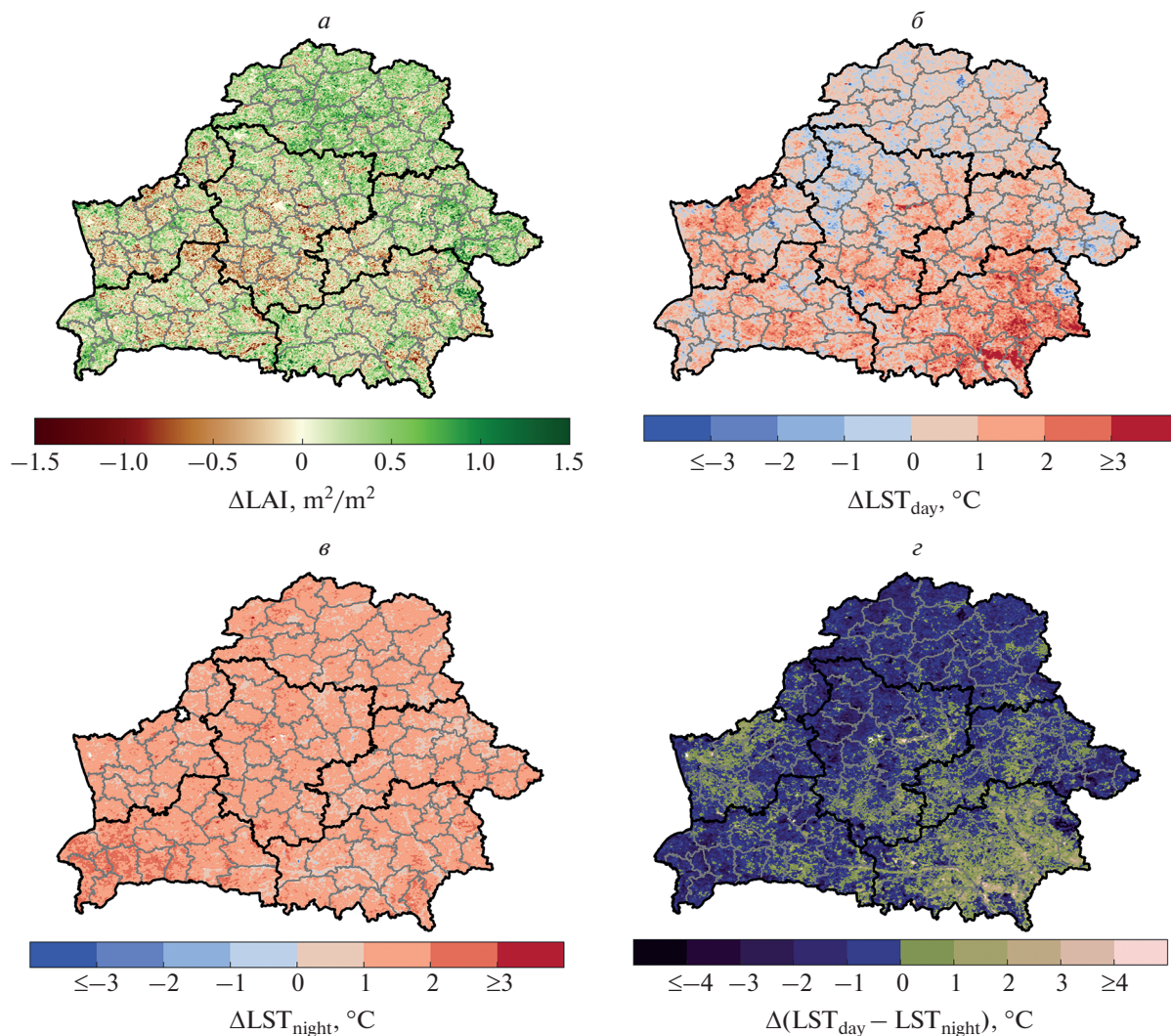


Рис. 1. Карты изменений листового индекса (а), дневной LST (б), ночной LST (е) и амплитуды суточного хода LST (z) на территории Беларуси за 2000–2020 гг.

большей устойчивости лесных экосистем к изменению климата по сравнению с агроценозами.

Средняя для летнего сезона ночная температура подстилающей поверхности растет практически равномерно на всей территории Беларуси со средней скоростью $0.066^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (б), что на 65% опережает скорость потепления в дневное время суток ($0.04^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Скорость ночного потепления в северной и южной биоклиматических зонах Беларуси различается всего на 7.5%, а ее среднее различие для лесов и сельхозугодий составляет лишь 3.6%. Для сравнения, средняя скорость дневного потепления для отмеченных биоклиматических зон отличается в 1.8 раз, а для различных типов подстилающей поверхности — более чем в 3 раза.

Отмеченное различие темпов ночного и дневного потепления характерно для всего северного

полушария и, предположительно, связано с суточным ходом толщины пограничного слоя атмосферы (Davy et al., 2017). В ночное время суток, когда в результате радиационного выхолаживания подстилающей поверхности повышается устойчивость атмосферы и ослабляется турбулентный обмен, пограничный слой имеет минимальную толщину и поэтому гораздо легче прогревается за счет парникового эффекта, чем в дневные часы. В связи с этим парниковое потепление в ночные часы характеризуется гораздо большей интенсивностью и пространственной однородностью чем в дневное время суток.

Пространственное распределение тренда дневной LST определяется влиянием на нее не только парниковых газов, но и ряда других факторов, в первую очередь, альбедо и эвапотранспирации, регулирующих радиационный и тепловой баланс

подстилающей поверхности. Сравнивая пространственные распределения трендов дневной LST и LAI, можно заметить, что наибольший рост LST происходит в регионах с интенсивным понижением LAI, вызванным как хозяйственной деятельностью (вырубки леса), так и воздействием экстремальных погодных явлений (шквалистый ветер, засухи и др.).

За последние 20 лет наибольшее летнее потепление отмечалось на юго-востоке Беларуси (Гомельская область), что можно отчетливо видеть на карте коэффициента линейного тренда дневной LST (рис. 1, б). В почвенном покрове этого региона преобладают легкие песчаные почвы с невысокой влагоудерживающей способностью и низкой теплоемкостью. Дневная LST в Гомельской области за период с 2000 по 2020 годы в среднем увеличилась на 1.56°C , тогда как в остальной части Беларуси рост дневной LST в среднем составил 0.68°C . Для пахотных земель Гомельской области рост дневной LST еще более существен: $+2.24^{\circ}\text{C}$ с начала текущего столетия. Амплитуда суточного хода LST в этом регионе за рассматриваемый период увеличилась в среднем на 0.23°C , а для пахотных земель — на 0.85°C , тогда как в остальной части Беларуси амплитуда суточного хода LST в среднем уменьшилась на 0.71°C . Главной причиной аномального изменения амплитуды суточного хода LST на юго-востоке Беларуси, по-видимому, является усиление засушливости климата этого региона. Местные песчаные почвы легко прогреваются солнечной радиацией днем и быстро выхолаживаются ночью, причем с уменьшением увлажненности почвы эти процессы усиливаются. В результате рост дневных температур на юго-востоке Беларуси опережает рост ночных, что в некоторой степени противоречит общим особенностям парникового потепления (Davy et al., 2017).

На рис. 2 представлены временные ряды средней для Гомельской области Беларуси амплитуды суточного хода температуры различных типов подстилающей поверхности (летний период). Во все засушливые годы, и в особенности в 2002 и 2015 гг., когда в Беларуси отмечались наиболее сильные летние засухи, амплитуда суточного хода LST была значительно выше ее среднего значения: на 16–24% в 2002 г. и на 21–33% в 2015 г. В засушливые годы увеличение средней амплитуды суточного хода LST для Гомельской области доходило до 2.5°C . Так, в 2015 году средняя дневная LST в Гомельской области была на 2.0°C выше нормы, а ночная LST — на 0.5°C ниже нормы. При этом сильные засухи 2015 года, когда на многих гидрологических постах были зафиксированы исторические минимумы уровней поверхностных и грунтовых вод (Лысенко и др., 2020), очевидно, привели к структурному сдвигу во временном ряду температуры всех типов подстилающей

поверхности (рис. 2), что говорит о длительном периоде восстановления водных ресурсов и естественного состояния экосистем региона.

Вторым важным фактором, определяющим величину суточного хода LST, является растительный покров подстилающей поверхности. Его наличие обеспечивает охлаждение подстилающей поверхности в дневное время суток (за счет эвапотранспирации) и препятствует ее радиационному выхолаживанию в ночные часы (за счет обратного рассеяния уходящего теплового излучения). По этой причине амплитуда суточного хода LST для лугов и пахотных земель оказывается значительно выше, чем для лесных массивов. Это можно видеть на примере земель Гомельской области Беларуси, для которых отчетливо прослеживается тенденция уменьшения амплитуды суточного хода LST с увеличением густоты растительного покрова (рис. 2).

Для понимания того, насколько наблюдаемые изменения летней LST на территории Беларуси обусловлены глобальным потеплением, а насколько — влиянием землепользования, процессами деградации земель и другими факторами, рассмотрим связь LST с температурой воздуха на высоте 2 м ($T_{2\text{m}}$). Температура $T_{2\text{m}}$ входит в число стандартных параметров, регулярно измеряемых на сети метеорологических станций. Нами использовались суточные значения $T_{2\text{m}}$ на 50 метеорологических станциях Республики Беларусь (официальные данные национальной гидрометеорологической службы) и 20 ближайших станциях соседних государств (данные с сайта rogo-daiklimat.ru). Суточные значения $T_{2\text{m}}$ на метеорологических станциях усреднялись за летний период каждого года доступного ряда наблюдений — с 1955 по 2021 г. Далее проводилась интерполяция станционных значений $T_{2\text{m}}$ на сетку географических координат, соответствующую спутниковым данным LST, методом простого кригинга (Goovaerts, 1997) и вычисление трендов $T_{2\text{m}}$ в каждом узле сетки методом сингулярного спектрального анализа при длине скользящего окна 20 лет (Golyandina et al., 2015). Для нахождения тренда $T_{2\text{m}}$ использовался весь доступный ряд наблюдений, а изменение $T_{2\text{m}}$ за период, охватываемый данными спутниковыми прибора MODIS (с 2000 года), рассчитывалось по значениям тренда в крайних точках данного периода.

Карта изменения приземной температуры воздуха на территории Беларуси за период с 2000 по 2021 гг. приведена на рис. 3, а. Среднее изменение $T_{2\text{m}}$ за указанный период составило 1.02°C , что примерно на 19% превышает изменение средне-суточной температуры подстилающей поверхности — 0.86°C (рис. 3, б). Это обстоятельство, вероятно, связано с увеличением лесистости рассматриваемой территории. Одновременно с этим во

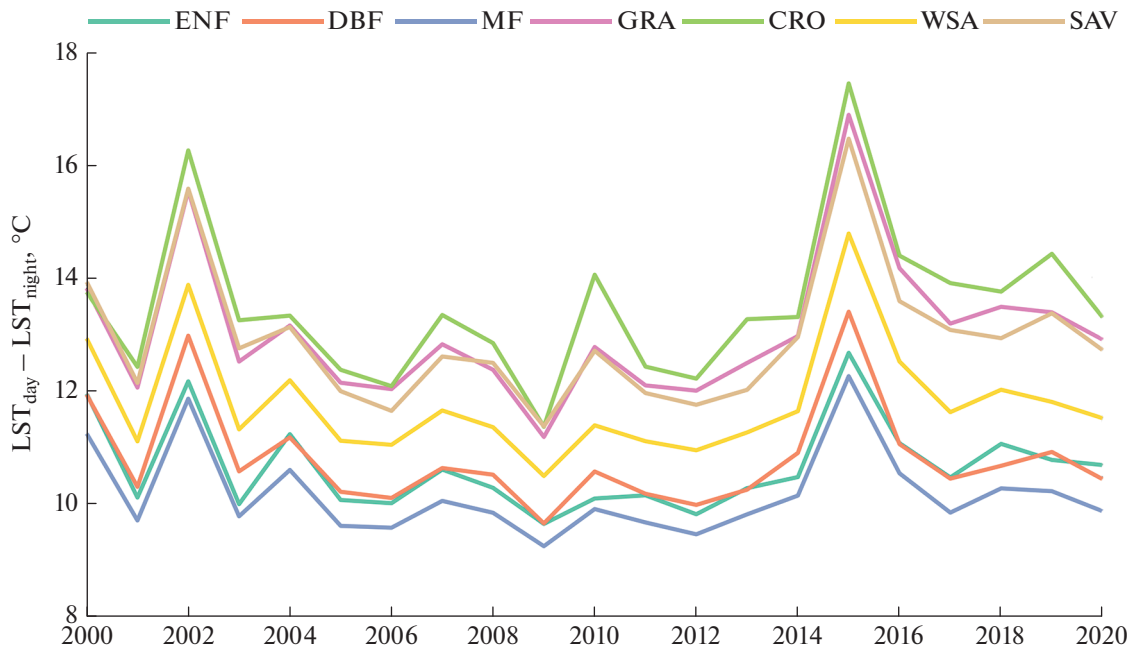


Рис. 2. Временные ряды средней амплитуды суточного хода летней LST для различных типов подстилающей поверхности в пределах Гомельской области Беларуси (классификация MODIS Land Cover Type): ENF – вечнозеленые хвойные леса, DBF – листопадные широколиственные леса, MF – смешенные леса, GRA – луга, CRO – пашни, WSA – лесостепи, SAV – степи.

многих регионах Беларуси, в которых отмечается снижение листового индекса, рост температуры подстилающей поверхности значительно опережает рост температуры воздуха. В этой связи представляет интерес отдельно выделить вклад глобального потепления (увеличения T_{2m}) в изменение LST.

Отмеченная задача решалась в три этапа. На первом этапе строились линейные регрессии между LST и T_{2m} , имеющие стандартный вид:

$$LST(x, y) = a(x, y)T_{2m}(x, y) + b(x, y),$$

где a и b – коэффициенты регрессии, x и y – координаты точки на земной поверхности, соответствующие узлам сетки LST. На втором этапе методом сингулярного спектрального анализа вычислялось изменение приземной температуры воздуха (ΔT_{2m}) в каждом узле расчетной сетки за период с 2000 по 2021 гг. И на заключительном этапе вычислялось искомое изменение LST, обусловленное ее зависимостью от T_{2m} : $\Delta LST_{clim}(x, y) = a(x, y)\Delta T_{2m}(x, y)$.

Коэффициент детерминации, показывающий долю общей дисперсии LST, объясняемую приземной температурой воздуха, приведен для территории Беларуси на рис. 3, в. Представленное на рисунке пространственное распределение коэффициента детерминации достаточно хорошо согласуется с распределением тренда листового индекса (рис. 1, а). Помимо этого, пространствен-

ное распределение коэффициента детерминации имеет четкую широтную зональность – возрастает от 0.2–0.6 на юге до 0.5–0.85 на севере Беларуси. В южных областях Беларуси (Брестская и Гомельская) рассматриваемый коэффициент детерминации достигает минимальных значений. Это связано с тем, что в этих достаточно засушливых в современный период областях Беларуси важным фактором регулирования температуры подстилающей поверхности является эвапотранспирация, которая зависит не только от температуры воздуха, но и от запасов почвенной влаги и общего состояния почвенно-растительного покрова.

Рассчитанное отношение фактического и климатически обусловленного изменения летней LST представлено для рассматриваемого региона на рис. 3, г. Примерно на 40% площади региона это отношение меньше единицы, т.е. рост LST под влиянием глобального потепления замедляется действием других факторов, не связанных напрямую с температурой воздуха. В тоже время примерно на 8% рассматриваемой территории фактическое изменение LST в 2–4 раза превышает ее климатическую составляющую. В первую очередь это касается территории Гомельской области Беларуси, отличающейся наибольшим усилением засушливости климата и наиболее явной деградацией почвенно-растительного покрова.

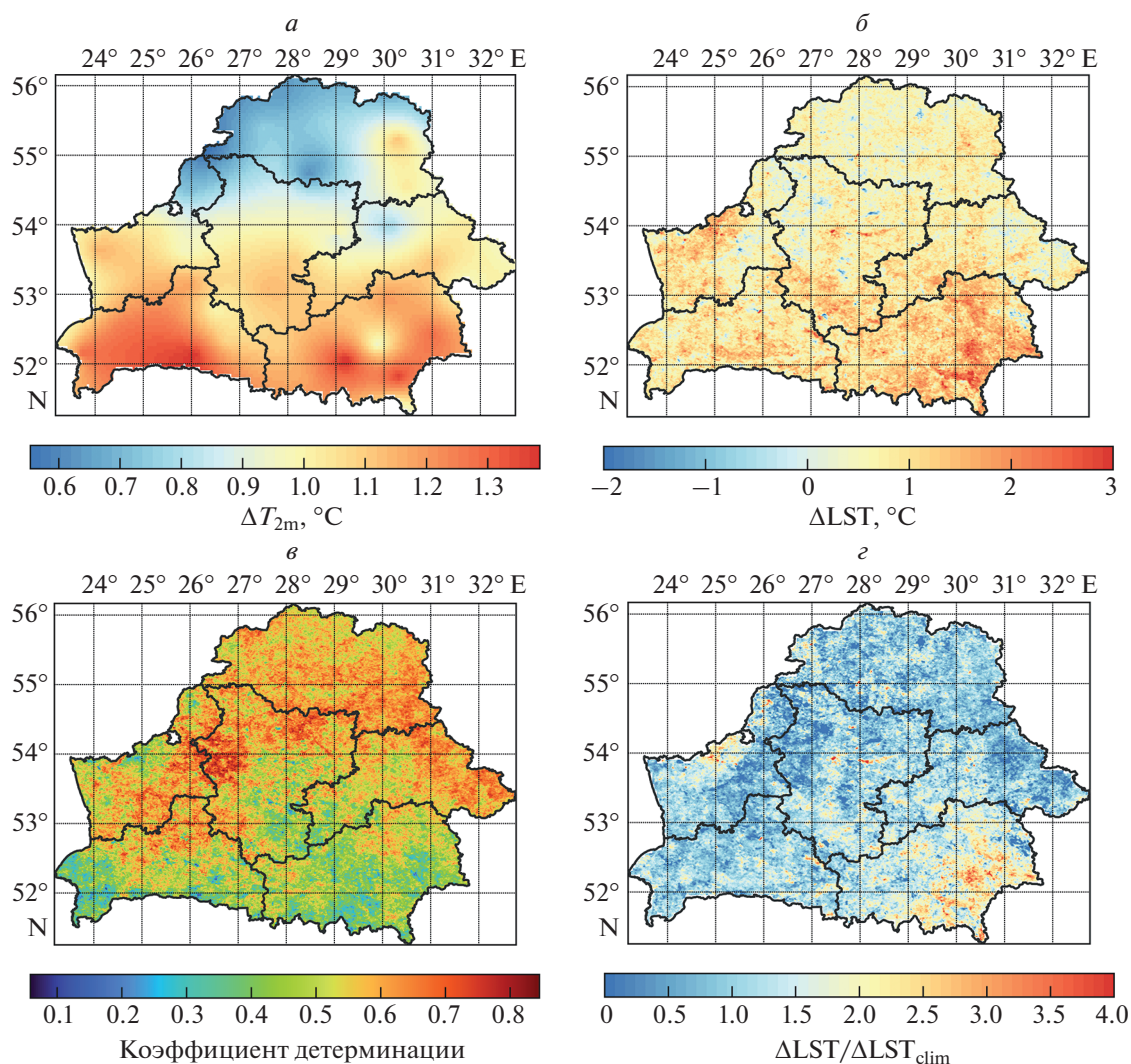


Рис. 3. Взаимосвязи между межгодовой изменчивостью и трендами температуры воздуха на высоте 2 м (T_{2m}) и температуры подстилающей поверхности (LST): *a* – изменение тренда T_{2m} за период с 2000 по 2021 годы, *b* – аналогичное изменение тренда LST, *v* – коэффициент детерминации для регрессионной зависимости LST от T_{2m} , *z* – отношение фактического изменения LST и ее изменения, обусловленного потеплением приземного воздуха.

ОЦЕНКИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ LST И LAI

Для количественной оценки влияния растительного покрова на температуру подстилающей поверхности проводилось пространственное агрегирование величин LST и LAI на уровне административных районов Беларуси. Средние для летнего периода значения LST и LAI сопоставлялись для каждого административного района с разделением по типу подстилающей поверхности. В качестве примера на рис. 4 сопоставлены значения дневной LST и LAI для различных земель Мозырского района Беларуси. Видно, что несмотря на существенное различие типов подстилающей поверхности, связь между дневной LST и LAI для данного района в среднем близка к линейной с коэффи-

циентом $\partial LST / \partial LAI \approx -1.13$ К. Столь высокая чувствительность LST к LAI обуславливает значительный разброс LST даже в пределах одного сравнительно небольшого района ($\sim 10^\circ\text{C}$).

Коэффициенты чувствительности дневной LST к LAI, рассчитанные для всех районов Беларуси, приведены в картографическом виде на рис. 5. Широтная зависимость этих коэффициентов обусловлена влиянием солнечной радиации на дневную температуру подстилающей поверхности, а также существенным различием увлажненности почв на севере и юге Беларуси. Видно, что эти коэффициенты изменяются в достаточно широком диапазоне: от -1.47 до -0.21°C с максимальными значениями на юге и минимальными на севере Беларуси. Таким образом, температур-

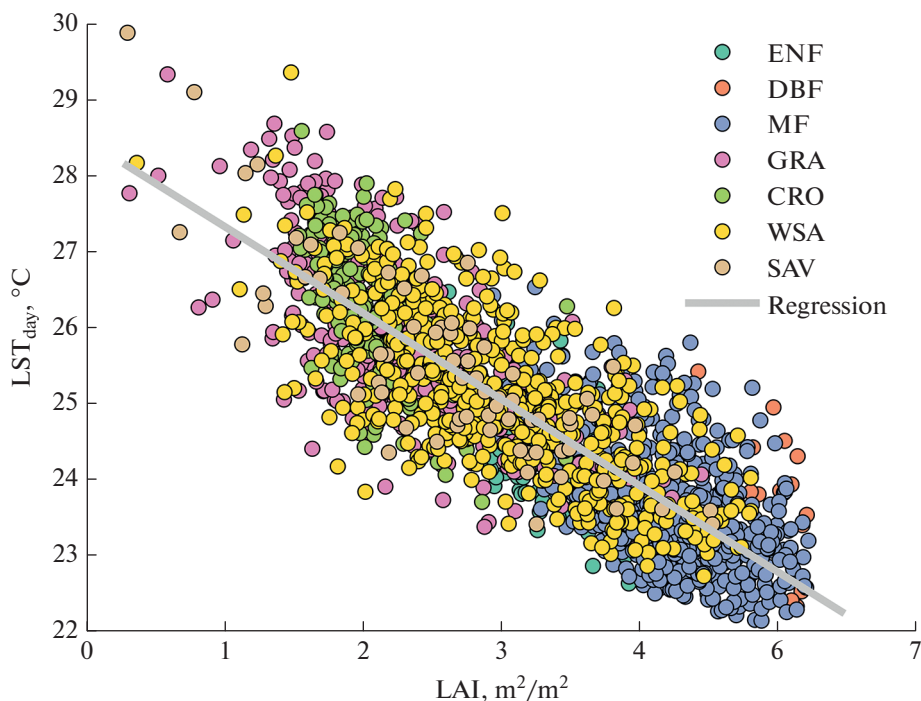


Рис. 4. Сопоставление значений дневной температуры подстилающей поверхности (LST_{day}) и листового индекса (LAI) для земель Мозырского района Беларуси (52.05° с.ш., 29.23° в.д.). Разными цветами обозначены различные типы подстилающей поверхности в классификации MODIS Land Cover Type.

ные аномалии, обусловленные одним и тем же изменением LAI, на севере и юге Беларуси различаются в несколько раз. Именно поэтому сокращение растительного покрова на юге Беларуси сопровождается столь интенсивным ростом температуры подстилающей поверхности (см. рис. 1, а и 1, б).

Эмпирические зависимости LST от LAI, установленные для административных районов Беларуси, позволяют ответить на вопрос, как изменение LAI потенциально может сказаться на средней температуре в этих районах. Фактические изменения LAI для территории Беларуси приведены на рис. 1, а. Соответствующие им изменения среднесуточной LST и амплитуды ее суточного хода, рассчитанные на основе установленных коэффициентов $\partial LST/\partial LAI$, представлены на рис. 6. Рассчитанные пространственные распределения ΔLST характеризуют температурный форсинг, связанный с изменением листового индекса подстилающей поверхности. Положительный знак этого форсинга означает усиление, а отрицательный — замедление потепления на локальном уровне за счет альбедных, эвапотранспирационных и других связанных с подстилающей поверхностью факторов.

Увеличение листового покрытия Беларуси в последние два десятилетия в целом оказывало слабый охлаждающий эффект на подстилающую

поверхность (отрицательный знак температурного форсинга LAI фиксируется на 64% общей площади Беларуси). За счет увеличения LAI средняя летняя температура подстилающей поверхности в Беларуси уменьшилась на 0.052°C, что примерно на 4.5% замедлило летнее потепление (фактическое увеличение летней LST за 2000–2020 гг. составило 1.11°C). В северной части Беларуси (выше 54° с.ш.) охлаждающий эффект LAI оказался более выраженным: -0.09°C при фактическом увеличении летней LST на 0.83°C. Отрицательный температурный форсинг LAI проявляется главным образом за счет дневных температур. Так, в северной части страны рост дневной температуры в последние два десятилетия замедлялся эффектом увеличения растительного покрова более чем на 30% (связанный с LAI температурный форсинг составил -0.17°C при фактическом изменении дневной LST $+0.35^\circ\text{C}$). Влияние LAI на ночные температуры на порядок меньше: средний для Беларуси температурный форсинг LAI в ночное время суток можно оценить величиной $+0.02^\circ\text{C}$ при фактическом изменении ночной LST $+1.39^\circ\text{C}$. Положительный знак температурного форсинга LAI в ночное время суток указывает на тепляющий эффект, оказываемый увеличением LAI, что, вероятно, связано с замедлением радиационного выхолаживания почвы в результате увеличения ее листового покрытия.

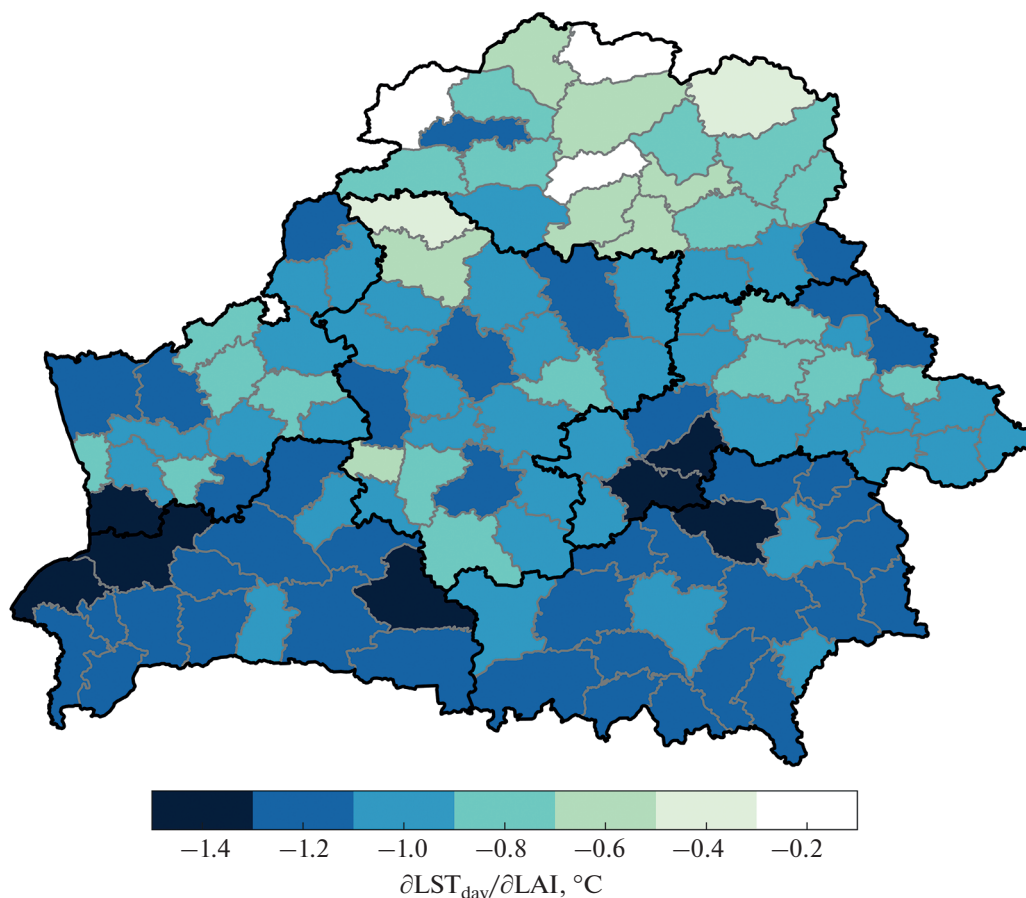


Рис. 5. Средние коэффициенты чувствительности дневной температуры подстилающей поверхности к изменению листового индекса (летний период) для административных районов Беларуси.

Анализ температурного форсинга LAI с разделением по типу подстилающей поверхности показывает, что отрицательный знак этого форсинга (охлаждающий эффект) приходится преимущественно на лесные земли. Для них температурный форсинг LAI в среднем составил -0.14°C для среднесуточной и -0.27°C для дневной температуры при их фактическом увеличении на 1.01 и 0.63°C соответственно. Температурный форсинг LAI примерно вдвое замедлил рост дневной температуры лесных земель на севере (выше 54°с.ш.) и более чем на четверть на юге.

Для сельскохозяйственных земель картина совсем иная. Для них изменение LAI (преимущественно отрицательного знака) усиливают летнее потепление. Положительный знак температурного форсинга LAI отмечается на 63% общей площади пахотных земель, тогда как для лесных земель — лишь на 6.9%. За счет уменьшения LAI среднесуточная температура пахотных земель увеличилась в среднем на 0.083°C . В северных регионах Беларуси (выше 54°с.ш.) изменение LAI практически не сказалось на средней летней температуре па-

хотных земель, однако в южных регионах оно обусловило дополнительное потепление на 0.11°C , что ускорило рост летней LST пахотных земель на 7.9% с примерно одинаковым вкладом в дневные и ночные температуры. Примерно на 15% пахотных земель Беларуси уменьшение LAI усиливало летнее потепление более чем на четверть. Примерно на 18% их площади в результате изменений растительного покрова произошло увеличение амплитуды суточного хода температуры, причем на 8.2% их площади — более чем на 1°C . Рост колебаний LST на протяжении суток означает, что уменьшение растительного покрова усиливает прогревание почвы в дневные часы и ее радиационное выхолаживание ночью.

С учетом наметившихся негативных тенденций в изменении биоклиматических показателей многих земель Беларуси представляет интерес выделить территории, наиболее подверженные процессам изменения климата и деградации почвенно-растительного покрова. К таким территориям будем относить территории, которые характеризуются статистически достоверными при за-

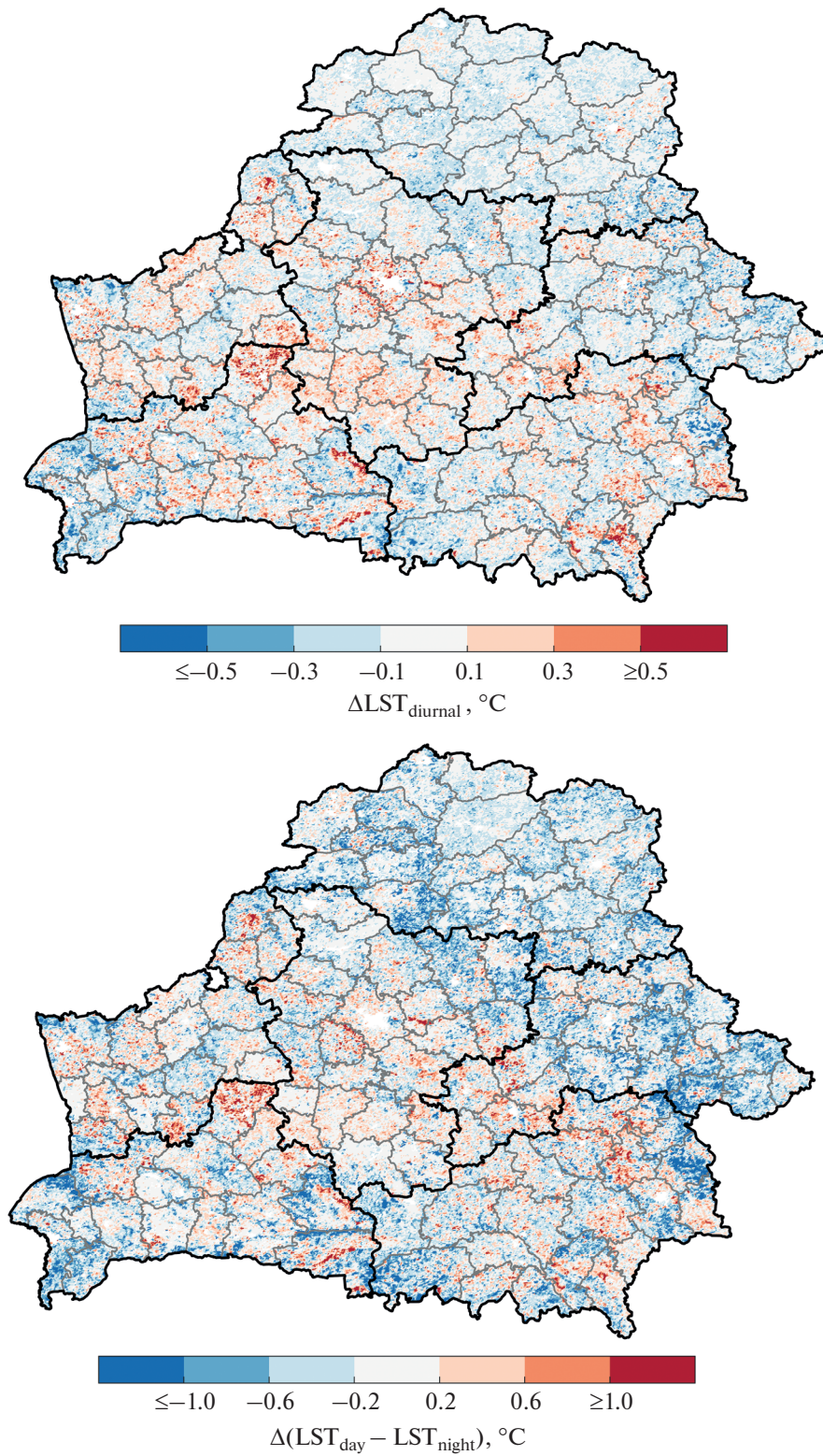


Рис. 6. Карты изменений среднесуточной температуры и амплитуды суточного хода температуры подстилающей поверхности в результате изменений листового индекса за период с 2000 по 2020 годы.

данном уровне значимости p трендами LAI и LST, удовлетворяющими следующим условиям:

$$\partial \text{LAI} / \partial t < 0, \quad (1)$$

$$\partial \text{LST}_{\text{day}} / \partial t + \partial \text{LST}_{\text{night}} / \partial t > 0, \quad (2)$$

$$\partial \text{LST}_{\text{day}} / \partial t - \partial \text{LST}_{\text{night}} / \partial t > 0, \quad (3)$$

$$(\partial \text{LST}_{\text{day}} / \partial \text{LAI} + \partial \text{LST}_{\text{night}} / \partial \text{LAI}) \partial \text{LAI} / \partial t > 0, \quad (4)$$

$$(\partial \text{LST}_{\text{day}} / \partial \text{LAI} - \partial \text{LST}_{\text{night}} / \partial \text{LAI}) \partial \text{LAI} / \partial t > 0, \quad (5)$$

где в качестве производных по времени $\partial/\partial t$ используются коэффициенты линейных трендов LST и LAI за период 2000–2020 гг., а производная $\partial \text{LST} / \partial \text{LAI}$ вычисляется для каждого административного района Беларуси как средний для этого района коэффициент регрессии между LST и LAI.

Условие (1) при заданном уровне статистической значимости означает деградацию растительного покрова, (2) – аномальный рост температуры подстилающей поверхности, (3) – усиление колебаний температур на протяжении суток, т.е. экстремальности климата. Условия (4) и (5) означают, что процессы потепления и увеличения амплитуды суточного хода температуры усиливаются связанными с LAI факторами (альбедными, эвапотранспирационными и др.).

Карта земель Беларуси, для которых изменения LST и LAI удовлетворяют условиям (1)–(5) при уровне статистической значимости $p = 0.05$, представлена на рис. 7. Интенсивность цвета на данной карте соответствует температурному форсингу LAI (правая часть условия (4)). Наиболее яркие районы на карте соответствуют максимальной величине этого форсинга. Средняя скорость летнего потепления в выделенных на карте районах в 2.3 раза выше, чем на остальной территории страны. Листовой индекс в этих районах за 2000–2020 гг. понизился почти на 40% ($-1.01 \text{ м}^2/\text{м}^2$ при среднем значении $2.51 \text{ м}^2/\text{м}^2$), что свидетельствует об интенсивной деградации земель. Средняя величина температурного форсинга LAI для выделенных районов составляет $+0.48^\circ\text{C}$, что находится на верхней границе его диапазона для территории Беларуси (рис. 6, а).

Стоит отметить, что все территории Беларуси, имеющие вышеотмеченные признаки биоклиматической деградации, относятся к зоне с понижающимся гидротермическим коэффициентом (Логинов и др., 2020), что означает усиление засушливости климата. Систематическое понижение запасов почвенной влаги, а в добавок к этому еще и сокращение растительного покрова, затрудняют охлаждение поверхности за счет испарения и усиливают ее прогревание в дневное время суток. Вероятно, именно поэтому выделен-

ные территории характеризуются столь быстрыми темпами летнего потепления.

В свою очередь рост температуры подстилающей поверхности усиливает потери почвенной влаги на испарение, что в засушливых условиях приводит к угнетению растительности и еще большим потерям растительного покрова. Таким образом на землях Беларуси с вышеотмеченными признаками биоклиматической деградации, вероятно, работают положительные обратные связи между температурой, почвенной влагой и наземной растительностью, которые в условиях изменения климата приводят к ускоренному иссушению почвы и деградации растительного покрова. Учитывая крайне неравномерное распределение земель с вышеописанными признаками деградации, можно предположить существование пороговых для данных почвенно-климатических условий величин листового индекса, начиная с которых положительные обратные связи между температурой, почвенной влагой и наземной растительностью обеспечивают самоподдерживающуюся деградацию земель. Триггером такой формы деградации земель может быть либо частичный свод растительности в результате различных хозяйственных мероприятий, либо недостаточные меры адаптации сельского и лесного хозяйства к изменению климата.

В настоящее время в Беларуси примерно 1.8% земель общей площадью 373 тыс. га характеризуются вышеописанными тенденциями биоклиматической деградации. Из них 58% земель площадью 215 тыс. га – это пахотные земли, что составляет примерно 2.1% их общего фонда. Это говорит о том, что меры по адаптации сельского хозяйства к изменению климата, предпринимаемые в отдельных районах Беларуси, недостаточны и нуждаются в пересмотре и корректировке. В первую очередь это касается районов Гомельской и Брестской областей Беларуси. Однако вышеотмеченным критериям биоклиматической деградации удовлетворяют пахотные земли и некоторых районов Минской и Гродненской областей. В связи с этим выделенные районы требуют повышенного внимания и первоочередного внедрения современных технологий адаптации к изменению климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Скорость летнего потепления в значительной степени зависит от радиационных и эвапотранспирационных факторов регулирования температуры подстилающей поверхности. В этой связи изучение обратных связей между температурой поверхности и ее растительным покровом имеет важное значение для понимания и предупреждения негативных процессов климатической деградации земель.

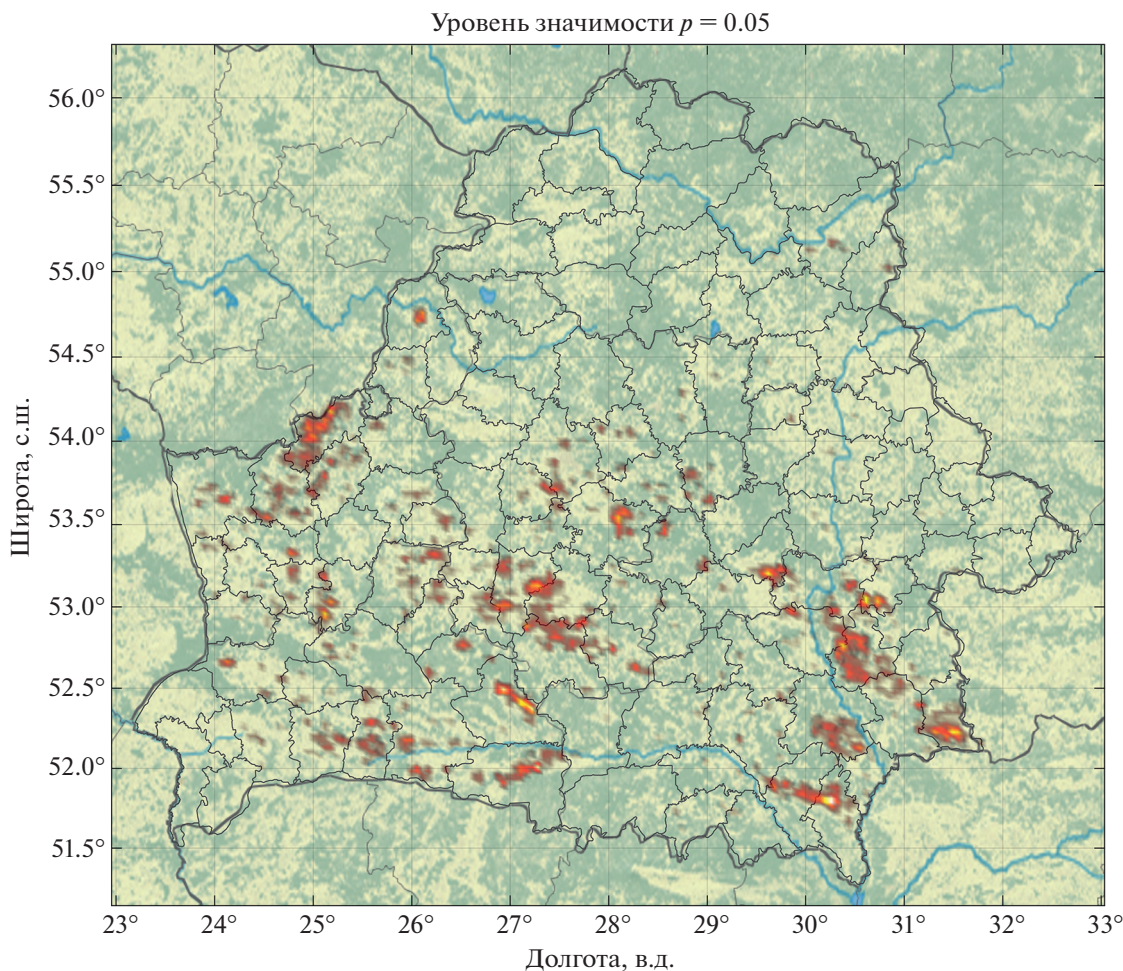


Рис. 7. Очаги биоклиматической деградации земель Беларуси, выделенные на основании критериев (1)–(5) при уровне статистической значимости $p = 0.05$.

Результаты, полученные в настоящей работе, показывают, что несмотря на медленный рост среднего листового индекса Беларуси, происходящий главным образом за счет лесов, во многих районах отмечаются признаки деградации растительного покрова, которая сопровождается аномальным ростом температуры и усилением ее внутрисуточных колебаний.

В современный период примерно 373 тыс. га белорусских земель имеют признаки биоклиматической деградации. Их листовый индекс с 2000 по 2020 гг. понизился почти на 40% ($-1.01 \text{ м}^2/\text{м}^2$ при среднем значении $2.51 \text{ м}^2/\text{м}^2$), а средняя скорость летнего потепления на этих землях в 2.3 раза выше, чем в остальной части страны. Свыше половины деградирующих земель (58%) в настоящее время отведено под пашни и находится в южной части страны, где быстрое летнее потепление сопровождается усилением засушливости климата.

Установлено, что в летний период чувствительность дневной температуры подстилающей поверхности к изменению листового индекса на юге Беларуси в несколько раз выше, чем на севе-

ре. По этой причине процессы деградации растительного покрова в южных регионах Беларуси способны существенно ускорять рост летних температур. На землях сельскохозяйственного назначения снижение растительного покрова может обуславливать свыше четверти наблюдаемого там роста средней летней температуры подстилающей поверхности. 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. В этой связи районы Беларуси, в которых процессы биоклиматической деградации земель поддерживаются положительными обратными связями между температурой, почвенной влагой и растительным покровом, требуют особого внимания и первоочередного внедрения современных технологий адаптации к изменению климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воронков Н.А. Роль лесов в охране вод. Л.: Гидрометеопиздат, 1988. 286 с.

- Горный В.И., Крицук С.Г., Латышов И.Ш., Манвелова А.Б., Тронин А.А.* Спутниковое картирование риска перегрева городского воздуха (на примере г. Хельсинки, Финляндия) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 23–34.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34>
- Золотокрылин А.Н.* Климатическое опустынивание / отв. ред. А.Н. Кренке. М.: Наука, 2003. 246 с.
- Логинов В.Ф.* Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. Минск: ТетраСистемс, 2008. 496 с.
- 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.
- Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Хомич В.С., Семенченко В.П., Кулак А.В., Степанович И.М.* Признаки аридизации климата и их экосистемные проявления на территории Беларуси // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 4. С. 515–527.
<https://doi.org/10.31857/S2587556621040063>
- Лысенко С.А.* Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 77–88.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019677-88>
- Лысенко С.А., Логинов В.Ф., Буяков И.В.* Влияние крупномасштабных мод общей изменчивости атмосферы и океана в Атлантико-Европейском регионе на климат Беларуси // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2020. Т. 64. № 5. С. 609–616.
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-609-616>
- Лысенко С.А., Логинов В.Ф., Зайко П.О.* Влияние изменений климата на биопродуктивность наземных экосистем в Белорусско-Украинском Полесье // Метеорология и гидрология. 2022. Т. 47. № 1. С. 59–71.
<https://doi.org/10.3103/S1068373922010058>
- Молчанов А.А.* Гидрологическая роль леса. М.: АН СССР, 1960. 487 с.
- Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” Том 2. / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: ООО “Издательство МБА”, 2019. 476 с.
- Рахманов В.В.* Гидроклиматическая роль лесов. М.: Лесная промышленность, 1984. 240 с.
- Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С.* Анализ влияния запечатанности почвенного покрова и озеленения на поле температур Волгоградской агломерации по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 125–141.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-125-141>
- Шинкаренко С.С., Кошелева О.Ю., Гордиенко О.А., Дубачева А.А., Омаров Р.С.* Связь сезонной динамики температуры поверхности и NDVI урбанизированных территорий засушливой зоны (на примере волгоградской агломерации) // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 4. С. 72–83.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421040084>
- 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. V. 5. № 1: eaat4313.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Burrell A.L., Evans J.P., De Kauwe M.G.* Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification // Nat. Commun. 2020. V. 11. № 3853.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-17710-7>
- 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. V. 2. № 2. P. 122–129.
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>
- Davy R., Esau I., Chernokulsky A., Outten S., Zilitinkevich S.* Diurnal asymmetry to the observed global warming // Int. J. Climatol. 2017. V. 37. № 1. P. 79–93.
<https://doi.org/10.1002/joc.4688>
- Duan S.-B., Li Z.-L., Li H., Göttsche Fr.-M., Wu H., Leng P., Coll C.* Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements // Remote Sens. Environ. 2019. V. 225. P. 16–29.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>
- Duffy K.A., Schwalm C.R., Arcus V.L., Koch G.W., Liang L.L., Schipper L.A.* How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere? // Sci. Adv. 2021. V. 7. № 3: eaay1052.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1052>
- Fang H., Wang Y., Zhang Y., Li S.* Long-Term Variation of Global GEOV2 and MODIS Leaf Area Index (LAI) and Their Uncertainties: An Insight into the Product Stabilities // J. Remote Sens. 2021. V. 2021. № 9842830.
<https://doi.org/10.34133/2021/9842830>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sens. Environ. 2010. V. 114. № 1. P. 168–182.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>
- Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K.* Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package // J. Stat. Softw. 2015. V. 67. № 2. P. 1–78.
<https://doi.org/10.18637/jss.v067.i02>
- Goovaerts P.* Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.
- Green J.K., Konings A.G., Alemohammad S.H., Berry J., Entekhabi D., Kolassa J., Lee J.-E., Gentine P.* Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere // Nat. Geosci. 2017. V. 10. № 6. P. 410–414.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2957>
- Heimann M., Reichstein M.* Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // Nature. 2008. V. 451. № 7176. P. 289–292.
<https://doi.org/10.1038/nature06591>
- Jiao W., Wang L., Smith W.K., Chang Q., Wang H., D’Odorico P.* Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades // Nat. Commun. 2021. V. 12. № 3777.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24016-9>
- Lesk C., Coffel E., Winter J., Ray D., Zscheischler J., Senviratne S.I., Horton R.* Stronger temperature–moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields // Nature Food. 2021. V. 2. № 9. P. 683–691.
<https://doi.org/10.1038/s43016-021-00341-6>
- 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. V. 5. № 5. P. 470–474.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2581>

- Liu Y., Zhou R., Wen Z., Khalifa M., Zheng C., Ren H., Zhang Z., Wang Z. Assessing the impacts of drought on net primary productivity of global land biomes in different climate zones // *Ecological indicators*. 2021. V. 130. № 108146. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108146>
- Rasul A., Ibrahim S., Onojeghuo A.R., Balzter H. A Trend Analysis of Leaf Area Index and Land Surface Temperature and Their Relationship from Global to Local Scale // *Land*. 2020. V.9. № 10. P. 1–17. <https://doi.org/10.3390/land9100388>
- Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D. C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Summary for Policymakers // *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*, 2019.
- Xu L., Myneni R.B., Chapin III F.S., Callaghan T.V., Pinzon J.E., Tucker C.J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tømmervik H., Euskirchen E.S., Forbes B.C., Piao S.L., Anderson B.T., Ganguly S., Nemani R.R., Goetz S.J., Beck P.S.A., Bunn A.G., Cao C., Stroeve J.C. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nat. Clim. Change*. 2013. V. 3. № 6. P. 581–586. <https://doi.org/10.1038/nclimate1836>
- Zhang W., Wei F., Horion S., Fensholt R., Forkel M., Brandt M. Global quantification of the bidirectional dependency between soil moisture and vegetation productivity // *Agric. For. Meteorol.* 2022. V. 313. № 4: 108735. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108735>
- Zhu Z., Piao S., Myneni R.B., Huang M., Zeng Z., Canadell J.G., Ciais P., Sich S., Friedlingstein P., Arneeth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian Xu, Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T.A.M., Stocker B.D., Viogy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Zaehle S., Zeng N. Greening of the Earth and its drivers // *Nat. Clim. Change*. 2016. V. 6. № 6. P. 791–795. <https://doi.org/10.1038/nclimate3004>

Land Surface Temperature and Leaf Area Index Forward and Backward Linkages for Summer Time Period in Republic of Belarus

S. A. Lysenko

Institute of Nature Management of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

On the basis of Earth remote sensing data for 2000–2020 quantitative estimates of the influence of vegetation cover degradation on the summer warming in Belarus were obtained. The average leaf area index of Belarus for this period increased by 3.3%, mainly due to forest areas the leaf index of which increased by about 8%. The growth of the leaf area index slowed down the summer warming of forest lands in the north (above 54° N) by about half and by more than a quarter in the south of Belarus. At the same time, the leaf area index of croplands decreased by about 5%, which caused their additional warming and amplified their land surface temperature daily cycle for summer time period. Statistically significant signs of bioclimatic land degradation have been found on the territory of Belarus with a total area of about 400 thousand hectares, which are enhanced by high values of positive feedback between temperature, vegetation cover and soil moisture. About of 58% of the degrading lands are agricultural lands located mainly in the southern part of the country. On these lands, summer temperature grows 2 times faster than the average for Belarus, and their leaf index decreases at a rate of about 2% per year, which indicates the insufficiency of agriculture climate mitigation in certain regions of Belarus.

Keywords: climate change, land degradation, leaf area index, land surface temperature, feedbacks

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. V. 5. № 1: eaat4313. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4313>
- Burrell A.L., Evans J.P., De Kauwe M.G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. № 3853. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17710-7>
- Chen C., Park T., Wang X., Piao Sh., Xu B., Chaturvedi R.K., Fuchs R., Brovkin V., Ciais Ph., Fensholt R., Tømmervik 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. V. 2. № 2. P. 122–129. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>
- Davy R., Esau I., Chernokulsky A., Outten S., Zilitinkevich S. Diurnal asymmetry to the observed global warming // *Int. J. Climatol.* 2017. V. 37. № 1. P. 79–93. <https://doi.org/10.1002/joc.4688>
- Duan S.-B., Li Z.-L., Li H., Göttsche Fr.-M., Wu H., Leng P., Coll C. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements // *Remote Sens. Environ.* 2019. V. 225. P. 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.020>
- Duffy K.A., Schwalm C.R., Arcus V.L., Koch G.W., Liang L.L., Schipper L.A. How close are we to the temperature tipping point of the terrestrial biosphere? // *Sci. Adv.* 2021. V. 7. № 3: eaay1052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1052>
- Fang H., Wang Y., Zhang Y., Li S. Long-Term Variation of Global GEOV2 and MODIS Leaf Area Index (LAI) and Their Uncertainties: An Insight into the Product Stabilities // *J. Remote Sens.* 2021. V. 2021. № 9842830. <https://doi.org/10.34133/2021/9842830>
- Friedl M.A., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. № 1. P. 168–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.016>

- Golyandina N., Korobeynikov A., Shlemov A., Usevich K.* Multivariate and 2D Extensions of Singular Spectrum Analysis with the Rssa Package // *J. Stat. Softw.* 2015. V. 67. № 2. P. 1–78.
<https://doi.org/10.18637/jss.v067.i02>
- Goovaerts P.* Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.
- Gornyi V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Manvelova A.B., Tronin A.A.* Satellite mapping of the risk of urban air overheating (on the example of Helsinki, Finland) // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2022. V. 19. № 3. S. 23–34. (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34>
- Green J.K., Konings A.G., Alemohammad S.H., Berry J., Entekhabi D., Kolassa J., Lee J.-E., Gentine P.* Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere // *Nat. Geosci.* 2017. V. 10. № 6. P. 410–414.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2957>
- Heimann M., Reichstein M.* Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks // *Nature.* 2008. V. 451. № 7176. P. 289–292.
<https://doi.org/10.1038/nature06591>
- Jiao W., Wang L., Smith W.K., Chang Q., Wang H., D'Odorico P.* Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades // *Nat. Commun.* 2021. V. 12. № 3777.
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-24016-9>
- Lesk C., Coffel E., Winter J., Ray D., Zscheischler J., Seneviratne S.I., Horton R.* Stronger temperature–moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields // *Nature Food.* 2021. V. 2. № 9. P. 683–691.
<https://doi.org/10.1038/s43016-021-00341-6>
- 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. V. 5. № 5. P. 470–474.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2581>
- Liu Y., Zhou R., Wen Z., Khalifa M., Zheng C., Ren H., Zhang Z., Wang Z.* Assessing the impacts of drought on net primary productivity of global land biomes in different climate zones // *Ecological indicators.* 2021. V. 130. № 108146.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108146>
- Loginov V.F.* Global and regional climate change: causes and consequences. Minsk: TetraSystems, 2008. 496 p. (In Russian).
- Loginov V.F., Lysenko S.A., Melnik V.I.* Climate Change in Belarus: Causes, Consequences, Regulatory Opportunities, 2nd ed. Minsk: UE “Encyclopedics”, 2020. 264 p. (In Russian).
- Loginov V.F., Lysenko S.A., Khomich V.S., Semenchenko V.P., Kulak A.V., Stepanovich I.M.* Climate Aridization Signs and Their Ecosystem Displays on the Territory of Belarus // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya.* 2021. V. 85. № 4. P. 515–527. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S2587556621040063>
- Lysenko S.A.* Climate-Forced Changes of Bioproductivity of Terrestrial Ecosystems in Belarus // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2020. V. 56. № 9. P. 1080–1089.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019677-88>
- Lysenko S.A., Loginov V.F., Buyakov I.V.* Effect of large-scale modes of total variability of the atmosphere and ocean in the Atlantic-European region on the climate of Belarus // *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus.* 2020. V. 64. № 5. P. 609–616. (In Russian).
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-609-616>
- Lysenko S.A., Loginov V.F., Zaiko P.O.* Climate Change Impacts on Bioproductivity of Terrestrial Ecosystems in the Belarusian-Ukrainian Polesie // *Russian Meteorology and Hydrology.* 2022. V. 47. № 1. C. 34–39.
<https://doi.org/10.3103/S1068373922010058>
- National report “Global climate and soil cover in Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)” V. 2. / Ed. R.S.-H. Edelgeriev. M.: OOO Izdatelstvo MBA, 2019. 476 p. (In Russian).
- Rakhmanov V.V.* Hydroclimatic role of forests. Moscow: Le-snaya promyshlennost', 1984. 240 p. (In Russian).
- Rasul A., Ibrahim S., Onojeghuo A.R., Balzter H.* A Trend Analysis of Leaf Area Index and Land Surface Temperature and Their Relationship from Global to Local Scale // *Land.* 2020. V. 9. № 10. P. 1–17.
<https://doi.org/10.3390/land9100388>
- Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S.* Analysis of the effect of sealed soil cover and landscaping on the temperature field of the Volgograd agglomeration according to MODIS data // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2020. V. 17. № 5. S. 125–141 (In Russian).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-5-125-141>
- Shinkarenko S.S., Kosheleva O.Yu., Gordienko O.A., Dubacheva A.A., Omarov R.S.* Relationship between seasonal dynamics of surface temperature and NDVI in urbanized areas of the arid zone (on the example of the Volgograd agglomeration) // *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* 2021. № 4. S. 72–83. (In Russian).
<https://doi.org/10.31857/S0205961421040084>
- Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.-O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.).* Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Summary for Policymakers // *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems,* 2019.
- Voronkov N.A.* The role of forests in water protection. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 286 p. (In Russian).
- Xu L., Myneni R.B., Chapin III F.S., Callaghan T.V., Pinzon J.E., Tucker C.J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tømmervik H., Euskirchen E.S., Forbes B.C., Piao S.L., Anderson B.T., Ganguly S., Nemani R.R., Goetz S.J., Beck P.S.A., Bunn A.G., Cao C., Stroeve J.C.* Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // *Nat. Clim. Change.* 2013. V. 3. № 6. P. 581–586.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1836>
- Zhang W., Wei F., Horion S., Fensholt R., Forkel M., Brandt M.* Global quantification of the bidirectional dependency between soil moisture and vegetation productivity // *Agric. For. Meteorol.* 2022. V. 313. № 4: 108735.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108735>
- Zhu Z., Piao S., Myneni R.B., Huang M., Zeng Z., Canadell J.G., Ciais P., Sitch S., Friedlingstein P., Arneeth A., Cao C., Cheng L., Kato E., Koven C., Li Y., Lian Xu, Liu Y., Liu R., Mao J., Pan Y., Peng S., Peñuelas J., Poulter B., Pugh T.A.M., Stocker B. D., Viogy N., Wang X., Wang Y., Xiao Z., Yang H., Zaehle S., Zeng N.* Greening of the Earth and its drivers // *Nat. Clim. Change.* 2016. V. 6. № 6. P. 791–795.
<https://doi.org/10.1038/nclimate3004>
- Zolotokrylin A.N.* Climatic desertification / Resp. Ed. A.N. Krenke. Moscow: Nauka, 2003. 246 p. (In Russian).