

Влияние изменений климата на продуктивность экосистем Белорусского Полесья по дистанционным данным

А. П. ГУСЕВ

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины
Республика Беларусь, 246019, Гомель, ул. Советская, 104
E-mail: gusev@gsu.by

Статья поступила 10.01.2022

После доработки 25.01.2022

Принята к печати 08.02.2022

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты анализа изменений продуктивности лесных, болотных и пахотных экосистем восточной части Белорусского Полесья в 2000–2020 гг. по материалам спутниковых съемок (радиометр MODIS спутника Terra). Для оценки продуктивности использован нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI). Изучена корреляция между изменениями климатических показателей и NDVI. Установлено, что изучаемые экосистемы различаются по реакции на климатические изменения. Для лесных и болотных экосистем обнаружены статистически значимые положительные тренды NDVI. Достоверная корреляция этого показателя со средней температурой лета и количеством летних осадков не установлена. Для пахотных экосистем характерно отсутствие статистически значимого тренда продуктивности и достоверная отрицательная корреляция NDVI с температурой и положительная – с осадками. Влияние климатических характеристик на NDVI пахотных экосистем зависит от типа их почв.

Ключевые слова: экосистемы, изменение климата, NDVI, тренд, Белорусское Полесье.

Важный индикатор климатогенной реакции экосистем – их продуктивность, так как при изменении климата происходят сдвиги в функционировании и динамике экосистем, обусловленные трансформацией биологического круговорота и влагооборота [Коломыц, 2009; Коломыц и др., 2009]. Определение продуктивности экосистем от локального до глобального уровня основано на использовании дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В разных регионах мира установлено, что высокую степень корреляции с первичной продукцией и зеленой биомассой имеет нормализованный разностный вегетационный индекс – NDVI, рассчитываемый

по данным многозональной космической съемки по формуле: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, где NIR – значения отражения в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра [Box et al., 1989; Yengoh et al., 2014].

Наблюдения в разных регионах мира показывают рост значений NDVI в последние 30 лет, который объясняют повышением продуктивности растительного покрова под влиянием потепления климата и увеличения содержания углекислого газа в атмосфере [Bhatt et al., 2013; Gauthier et al., 2015; Zhu et al., 2016; Зуев и др., 2019]. В глобаль-

ном масштабе рост продуктивности растительности и, соответственно, значений NDVI по данным моделирования может быть обусловлен в значительной степени увеличением концентрации CO₂ в атмосфере [Zhu et al., 2016]. На региональном уровне на динамику продуктивности влияют особенности землепользования, процессы деградации и восстановления растительного покрова и другие факторы, что позволяет использовать NDVI как индикатор экологического состояния ландшафтов [Гусев, 2020; Гусев и др., 2020].

Имеются многочисленные данные, указывающие на рост первичной продуктивности экосистем Евразии и Северной Америки во второй половине XX в., индицируемый увеличением NDVI, которое в наибольшей степени проявляется в тундровых и таежных ландшафтах [Zhou et al., 2001; Bhatt et al., 2013; Gauthier et al., 2015; Зуев и др., 2019]. Например, в тундровых ландшафтах Югорского полуострова наблюдаются положительные тренды NDVI, которые предположительно маркируют участки с существенной деградацией многолетнемерзлых пород [Елсаков и др., 2013]. “Позеленение” тундры выражается через рост проективного покрытия травянистых растений (осок, злаков), кустарников и деревьев [Тишков и др., 2018]. Однако в ряде работ отмечается, что этот процесс пространственно неоднороден: в одних районах имеет место увеличение NDVI, а в других, наоборот, происходит снижение этого показателя. Уменьшение NDVI объясняется негативными последствиями потепления – расширением ареалов насекомых вредителей, ростом числа лесных пожаров, таянием “вечной мерзлоты” [Gauthier et al., 2015; Зуев и др., 2019]. Комплексные исследования с применением ДЗЗ выявили разнонаправленные и разномасштабные процессы восстановления и трансформации растительного покрова в арктической зоне России. При этом процессы “позеленения” Арктики, фиксируемые по росту NDVI, дестабилизируют естественный ход функционирования арктических ландшафтов [Тишков и др., 2019].

На Северном Кавказе установлено, что в горном лесолугово-степном, субальпийском и альпийском поясах в 2000–2013 гг. наблюдался рост NDVI, а в предгорьях и на рав-

нине – снижение, что коррелирует с изменениями увлажнения [Виноградова и др., 2015]. В работе [Шарый и др., 2020] показано, что связь NDVI лесных экосистем с характеристиками климата нелинейна и сильно изменяется в зависимости от лесной формации. Наибольшая корреляция между NDVI и климатическими показателями установлена для темнохвойных лесов.

Изучение многолетней (1982–2013 гг.) динамики NDVI в сельскохозяйственных ландшафтах лесостепной и степной зон Восточной Европы показало, что с 2000 г. отсутствует территориальное преобладание трендов, которые имели бы четкую направленность или высокий уровень значимости. При этом в разных подзонах лесостепей и степей соотношение удельной площади территорий с положительными и отрицательными трендами NDVI изменяется в широких пределах [Дронин и др., 2014; Тельнова, 2017].

Таким образом, влияние изменений климата на продуктивность экосистем в разных природных зонах неодинаково и может зависеть от различных факторов; не ясны конкретные механизмы передачи климатического сигнала с глобального уровня на локальный; непонятно насколько оценки, выполненные для глобального уровня (напр., [Zhu et al., 2016]), корректны для региональных и локальных экосистем.

Цель работы – изучение взаимосвязи изменений между продуктивностью, индицируемой по NDVI, и климатическими показателями в экосистемах Белорусского Полесья. Рассмотрены следующие аспекты проблемы: 1) имеются ли в регионе статистически значимые временные тренды NDVI и климатических показателей? 2) есть ли статистически значимая взаимосвязь изменений между NDVI и климатическими показателями? 3) каковы отличия климатогенных реакций продуктивности лесных, болотных и пахотных экосистем Полесья и какие из них наиболее чувствительны к климатическим изменениям?

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования выполнялись в восточной части Белорусского Полесья, расположенного

на юго-востоке Беларуси (рис. 1). По геоботаническому районированию регион относится к Полесско-Приднепровскому округу подзоны широколиственно-сосновых лесов [Юркевич и др., 1979]. Леса занимают 45,3 %, пахотные земли – 30,8 %, болота – 2,5 %, луга и кустарники – 15,1 %, застроенные и нарушенные земли – 4,5 % площади. Природные экосистемы представлены сосновыми, березовыми, осиновыми, черноольховыми, широколиственными и смешанными лесами, верховыми, переходными и низинными болотами. Значительная часть территории (более 50 %) – антропогенные экосистемы (пашни, пастбища и сенокосы, водохранилища и т. д.).

Объектами исследований являлись:

лесные экосистемы – сосновые, смешанные, мелколиственные и широколиственные леса (54 тестовых участка общей площадью 134,6 км²);

болотные экосистемы (ненарушенные) – низинные и верховые болота (7 тестовых участков, 510 км²);

пахотные экосистемы – обрабатываемые земли, сгруппированные по истории землепользования и по типам почв (104 тестовых участка, 932,4 км²).

Основные требования к тестовым участкам: относительно однородный растительный покров и отсутствие существенных нарушений или резких изменений землепользования (вырубок, пожаров, застройки и т. д.) в течение периода исследований. Средняя площадь тестовых участков 10,2 км² (от 1 до 50 км²). Валидация состояния растительности тестовых участков выполнялась на основе дешифрирования космических снимков спутников Landsat 4-5 TM (2000–2010 гг.) и Sentinel-2 MSI (2017–2020 гг.). Для каждого тестового участка по почвенной карте Беларуси (масштаб 1 : 500 000) установлен преобладающий тип почвенного покрова.

Изучаемый временной интервал – 2000–2020 гг.

Значения NDVI были получены из продукта MOD 13Q1 (съемка радиоспектрометра MODIS спутника Terra), который представляет собой растр с пространственным разрешением 250 м, скомпонованный из максимальных значений NDVI за 16 суток. Продукт MOD 13Q1 взят с ресурса NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>). Для ус-



Рис. 1. Местоположение района исследований в пределах Беларуси

ранения влияния сезонной вариабельности NDVI в процессе анализа использовали только летние композиты.

Операции по обработке и дешифрированию космических снимков Landsat 4–5 и Sentinel-2, создание векторного слоя тестовых участков, зональная статистика по композитам MOD 13Q1 осуществлялись в геоинформационной системе QGIS.

В работе исходили из предположения, что временной тренд NDVI имеет линейный характер и описывается уравнением $y = b \cdot t - a$, параметры которого определяются методом наименьших квадратов. Коэффициент тренда b показывает увеличение или уменьшение NDVI при изменении времени t на 1 год. Для оценки точности подбора уравнения тренда использовали коэффициент детерминации R^2 . Статистическую значимость коэффициента детерминации и уравнения тренда оценивали с помощью критерия Фишера.

Климатические показатели (средняя температура лета, летнее количество осадков, средняя температура года, годовое количество осадков) определяли на основе данных по метеостанциям “Гомель”, “Житковичи”, “Брагин”, “Октябрь”, “Василевичи”, “Жлобин”, расположенным в пределах региона.

Для оценки связи между изменениями NDVI и климатическими показателями использован непараметрический корреляционный анализ (рассчитывался коэффициент ранговой

корреляции Спирмена) и метод множественной регрессии. Для статистического анализа применяли программу STATISTICA 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно инструментальным наблюдениям в 1981–2015 гг. на территории Беларуси температура воздуха превысила климатическую норму на 1,3 °С. Если в 1950–1980-х годах суммы активных температур (>10 °С) на территории Белорусского Полесья составляли 2400–2600, то в 2000–2010 гг. – 2600–2800 градусов. В результате климатических изменений здесь образовалась новая агроклиматическая область, для которой характерны самая короткая и теплая зима и наиболее продолжительный вегетационный период по сравнению с другими регионами Беларуси [Логоинов, 2016].

Изменения влагообеспеченности в регионе носили более сложный характер. Изучение динамики гидротермического коэффициента Селянинова в 1989–2019 гг. (в сравнении с 1960–1988 гг.) показало, что в мае и сентябре наблюдался рост увлажнения, а в июне – падение. Установлено также, что повторяемость засух уменьшается в мае, но увеличивается в летний период [Бровка, Буяков, 2020]. С 1985 г. на территории региона наблюдается снижение количества осадков и испарения в июне, причем скорость уменьшения осадков в 4 раза выше скорости уменьшения испарения. В мае и июле, наоборот, наблюдается рост количества осадков, а в августе имеет место отрицательный тренд [Лысенко и др., 2020].

На основе анализа данных метеостанций, расположенных в изучаемом регионе, изменения климатических показателей в 2000–2020 гг. характеризуются следующими особенностями. Среднегодовая температура (осредненная по всем метеостанциям) изменялась от 7,2 °С (в 2003 г.) до 9,7 °С (в 2020 г.). Средняя температура лета – от 17,6 °С (2000 г.) до 21,9 °С (2010 г.). Для температурных показателей установлены статистически значимые положительные тренды, имеющие линейный характер. Так, среднегодовая температура и средняя температура лета увеличивались на 0,07 °С в год ($R^2 = 0,41$ и $R^2 = 0,20$ соответственно). Данный рост пространственно неоднороден. Например, на метеостанции

“Гомель” рост температур составил соответственно 0,064 и 0,055 °С в год, на метеостанции “Василевичи” – 0,061 и 0,045 °С в год, на метеостанции “Мозырь” – 0,083 и 0,077 °С в год. Наибольший рост температур зафиксирован на метеостанции “Брагин” – 0,087 и 0,11 °С в год.

Годовое количество осадков изменялось от 542 мм (2015 г.) до 868 мм (2012 г.); летнее количество осадков – от 135 мм (2015 г.) до 341 мм (2012 г.). Для показателей осадков характерен отрицательный, но статистически незначимый тренд ($R^2 = 0,01–0,02$). Так, на метеостанции “Гомель” наблюдалось статистически незначимое снижение годового количества осадков на 3,4 мм в год ($R^2 = 0,04$) и летнего количества осадков на 1,3 мм в год ($R^2 = 0,01$), на метеостанции “Брагин” – соответственно на 4,1 ($R^2 = 0,05$) и 1,7 ($R^2 = 0,02$) мм в год.

Изучение изменений NDVI в экосистемах региона в период 2000–2020 гг. показало следующее. Средние по региону летние NDVI лесных экосистем колебались в пределах от 0,774 до 0,822 (рис. 2). Данные изменения характеризуются статистически значимым линейным трендом – увеличение NDVI на 0,0015 в год при $R^2 = 0,43$. Максимальные значения летних NDVI в лесных экосистемах изменялись от 0,792 (2003 г.) до 0,842 (2020 г.), наблюдался статистически значимый линейный тренд (прирост NDVI 0,0011 в год, $R^2 = 0,36$). Такие статистически значимые положительные тренды средних и максимальных NDVI зафиксированы как для лесных экосистем региона в целом, так и для лесов отдельных районов (в Гомельском Полесье, Приднепровской низменности, на Мозырской гряде, в Припятском Полесье) и в разных родах ландшафтов (водно-ледниковых, аллювиальных террасированных, озерно-аллювиальных, моренно-зандровых, холмисто-моренно-эрозионных).

При этом на уровне лесных формаций характеристики тренда NDVI различаются. Так, например, значения коэффициентов детерминации изменяются от 0,27 (сосновые леса) до 0,60 (мелколиственные леса), значения коэффициентов линейного тренда – от 0,0013 (сосновые леса) до 0,0022 (мелколиственные леса). Наибольший прирост NDVI зафиксирован в смешанных насаждениях холмисто-мо-

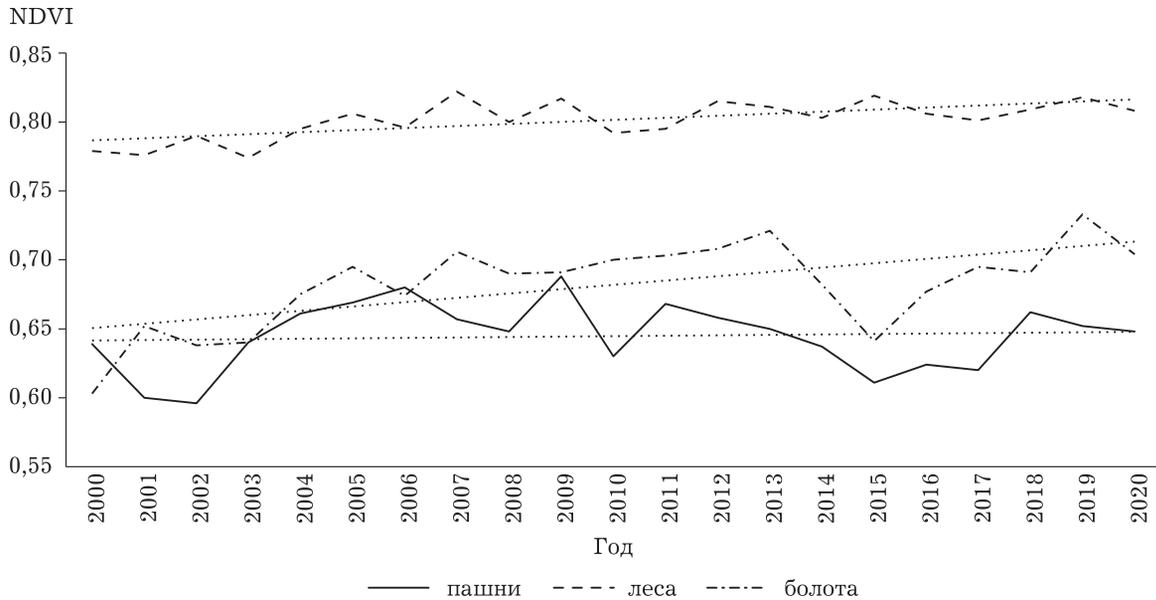


Рис. 2. Изменения средних значений NDVI в экосистемах восточной части Белорусского Полесья (точки – линии трендов)

ренно-эрозионного ландшафта (коэффициент линейного тренда составил 0,0031, а $R^2 = 0,46$). В отдельных случаях статистически значимый тренд для лесов не был обнаружен (например, сосновые леса Полесского государственного радиозоологического заповедника).

В болотных (ненарушенных) экосистемах средние значения NDVI изменялись от 0,603 (2000 г.) до 0,733 (2019 г.), наблюдался статистически значимый положительный тренд (коэффициент тренда – 0,0031 в год, $R^2 = 0,38$). Максимальные значения NDVI колебались от 0,661 (2000 г.) до 0,762 (2019 г.), испытывая также статистически значимый положительный тренд (коэффициент тренда – 0,0023 в год, $R^2 = 0,34$). Поскольку крупные не нарушенные мелиорацией болотные массивы находятся только в Припятском Полесье, то изучаемая выборка была представлена низинными и верховыми болотами, расположенными в озерно-болотных ландшафтах этого района.

В пахотных экосистемах средние значения NDVI для региона в целом изменялись от 0,596 (2002 г.) до 0,688 (2009 г.). Статистически значимый тренд отсутствовал ($R^2 = 0,006$, $p > 0,1$). Максимальные значения колебались в пределах от 0,632 (2015 г.) до 0,743 (2009 г.), статистически значимый тренд также отсутствовал ($R^2 = 0,005$, $p > 0,1$). Эти экосистемы отличаются наибольшей вариабельностью зна-

чений NDVI в течение летнего сезона, что обусловлено особенностями циклов выращивания разных сельскохозяйственных культур. Амплитуда колебаний NDVI в течение лета составляла от 0,045 до 0,26, в среднем – 0,101 (в 2 раза выше, чем амплитуда колебаний NDVI в лесах).

Для изучения связи между NDVI и климатическими показателями были применены корреляционный анализ и метод множественной регрессии. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 1, результаты множественной регрессии – в табл. 2.

Из табл. 1 видно, что статистически значимая корреляция между изменениями NDVI лесных экосистем и климатическими показателями лета отсутствует. Корреляционный анализ установил, что NDVI лесных экосистем (полная выборка) положительно коррелирует со среднегодовой температурой (коэффициент корреляции Спирмена 0,27, $p < 0,05$) и годовым количеством осадков (0,55, $p < 0,001$). При этом достоверная корреляция отсутствует для сосновых и смешанных лесов. Для мелколиственных и широколиственных лесов наблюдается достоверная корреляция NDVI со среднегодовой температурой (коэффициенты корреляции соответственно 0,47 и 0,44).

Метод множественной регрессии, в котором зависимым фактором выступал NDVI, а независимыми факторами – средняя тем-

Т а б л и ц а 1

**Связь NDVI с климатическими показателями по результатам корреляционного анализа
(коэффициент ранговой корреляции Спирмена)**

| Экосистемы | Климатический показатель | | | |
|------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Средняя температура лета, °С | Летнее количество осадков, мм | Среднегодовая температура, °С | Годовое количество осадков, мм |
| Лесные | Н. д. | Н. д. | 0,27, $p < 0,05$ | 0,55, $p < 0,001$ |
| Болотные | Н. д. | Н. д. | Н. д. | Н. д. |
| Пахотные | -0,49, $p < 0,01$ | 0,43, $p < 0,01$ | -0,51, $p < 0,01$ | 0,42, $p < 0,01$ |

П р и м е ч а н и е. Н. д. – значения коэффициента корреляции недостоверны, $p > 0,05$.

Т а б л и ц а 2

Связь NDVI с климатическими показателями по результатам метода множественной регрессии

| Экосистемы | Уравнение множественной регрессии | Коэффициент детерминации R^2 | Критерий Фишера F |
|------------|--|--------------------------------|-------------------|
| Лесные | Н. д.* NDVI=0,42· T_r + 0,66· O_r + 0,54** | Н. д. 0,44 | Н. д. 23,2 |
| Болотные | Н. д. Н. д. | Н. д. Н. д. | Н. д. Н. д. |
| Пахотные | NDVI = -0,32· T_l + 0,38· O_l + 0,83 NDVI = -0,26· T_r + 0,30· O_r + 0,71 | 0,33 0,24 | 14,6 9,2 |

П р и м е ч а н и е. * – летние показатели; ** – годовые показатели; T_l – средняя температура лета; O_l – летнее количество осадков; T_r – средняя температура года; O_r – годовое количество осадков; Н. д. – значения статистически недостоверны ($p > 0,05$).

пература лета и летнее количество осадков, статистически значимой связи не выявил как в случае полной выборки лесов, так отдельно по формациям.

Статистически значимое уравнение множественной регрессии для NDVI лесов было получено, когда в качестве независимых факторов выступали среднегодовая температура и годовое количество осадков (при $R^2 = 0,44$, т. е. 44 % вариабельности NDVI лесов обусловлено изменениями климатических показателей). Аналогичные статистически значимые уравнения множественной регрессии получены также для мелколиственных и широколиственных лесов (R^2 соответственно составили 0,47 и 0,25). Для сосновых и смешанных лесов уравнения множественной регрессии оказались недостоверны как для летних, так и для годовых показателей.

Для болотных экосистем статистически значимой связи NDVI с климатическими показателями не установлено ни корреляционным анализом (см. табл. 1), ни методом множественной регрессии (см. табл. 2).

Корреляционный анализ показал, что NDVI пахотных экосистем достоверно коррелирует с климатическими показателями, при этом с температурами – отрицательно, а с осадками – положительно (см. табл. 1). Корреляционная связь NDVI с климатическими показателями установлена для пахотных экосистем независимо от возраста их эксплуатации. NDVI пахотных экосистем на осушенных болотах коррелирует только с температурами, корреляция с осадками недостоверна.

Уравнения множественной регрессии для NDVI пахотных экосистем (вся выборка) включали как температуры, так и осадки. При этом летние температуры и осадки обуславливают 33 %, а среднегодовая температура и годовые осадки – 24 % вариабельности значений NDVI (см. табл. 2).

Была изучена связь NDVI пахотных земель с климатическими показателями в зависимости от типа почв (табл. 3). Для всех типов почв, кроме торфяно-болотных (осушенных), наблюдается положительная кор-

реляция NDVI с летними осадками (значения коэффициентов корреляции Спирмена превышают 0,5 при $p < 0,001$). Отрицательная корреляция NDVI со средней температурой лета характерна для дерново-подзолистых суглинистых, торфяно-болотных и пойменных дерновых и заболоченных почв. Отрицательная корреляция NDVI со среднегодовой температурой – для дерново-подзолистых суглинистых, дерново-подзолистых супесчаных и торфяно-болотных почв. Положительная корреляция NDVI с годовыми осадками статистически значима только для дерново-подзолистых суглинистых и дерново-подзолистых супесчаных почв (см. табл. 3).

Согласно результатам, полученным методом множественной регрессии, летние осадки обуславливают от 29 % (дерново-подзолистые песчаные заболоченные почвы) до 52 % (дерново-подзолистые суглинистые заболоченные почвы) вариабельности NDVI пахотных земель. Влияние годового количества осадков сказывается на NDVI только в случае дерново-подзолистых супесчаных почв. Среднегодовая температура влияет только на NDVI пашен на дерново-подзолистых суглинистых (25 % вариабельности) и торфяно-болотных (15 %) почвах. Средняя температура лета также от-

рицательно коррелирует со значениями NDVI пахотных экосистем с дерново-подзолистыми суглинистыми и торфяно-болотными почвами.

Таким образом, чувствительность NDVI пахотных экосистем к температурным показателям характерна только для дерново-подзолистых суглинистых и торфяно-болотных почв; для всех остальных типов почв статистически значимое влияние оказывает летнее количество осадков.

ОБСУЖДЕНИЕ

Положительный тренд NDVI в лесных и болотных экосистемах может объясняться как потеплением климата (благоприятно влияют на продуктивность увеличение вегетационного периода и “мягкие” зимы), так и другими причинами: а) ростом содержания CO_2 в атмосфере, способствующим фотосинтезу [Zhu et al., 2016]; б) увеличением среднего возраста древесных насаждений, зарастанием гарей и вырубок.

Исследования в заброшенных сельскохозяйственных ландшафтах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника и Ветковского спецлесхоза (зона радиоактивного загрязнения Черно-

Т а б л и ц а 3

Связь NDVI пахотных экосистем с климатическими показателями в зависимости от типа почв (коэффициент ранговой корреляции Спирмена)

| Тип почв | Климатический показатель | | | |
|--|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Средняя температура лета, °С | Летнее количество осадков, мм | Среднегодовая температура, °С | Годовое количество осадков, мм |
| Дерново-подзолистые суглинистые | Н. д. | 0,61 | -0,50 | 0,39 |
| Дерново-подзолистые суглинистые заболоченные | Н. д. | 0,69 | Н. д. | Н. д. |
| Дерново-подзолистые супесчаные | Н. д. | 0,65 | -0,38 | 0,38 |
| Дерново-подзолистые супесчаные заболоченные | Н. д. | 0,57 | Н. д. | Н. д. |
| Дерново-подзолистые песчаные | Н. д. | 0,59 | Н. д. | Н. д. |
| Дерново-подзолистые песчаные заболоченные | Н. д. | 0,56 | Н. д. | Н. д. |
| Торфяно-болотные (осушенные) | -0,43 | Н. д. | -0,41 | Н. д. |
| Пойменные дерновые и заболоченные | -0,54 | 0,48 | Н. д. | Н. д. |

П р и м е ч а н и е. Н. д. – значения коэффициента корреляции недостоверны, $p > 0,05$.

быльской АЭС) показали, что здесь развиваются процессы восстановительных сукцессий растительности, которые отражаются в многолетних изменениях NDVI, описываемые уравнениями линейного тренда (коэффициенты детерминации $R^2 = 0,27-0,74$). На выведенных из оборота землях наблюдался рост NDVI (за 19 лет до 0,1), который, вероятно, обусловлен комплексом восстановительных процессов: зарастанием сельскохозяйственных земель, вырубок, полян, просек [Гусев и др., 2020, 2021]. Поскольку при отборе тестовых участков в нашем случае исключались леса, нарушенные рубками и пожарами, то выявленный положительный тренд NDVI лесных и болотных экосистем не может быть объяснен восстановительными сукцессиями.

Как указано выше, статистически значимая связь между NDVI лесных экосистем (независимо от формации) и климатическими показателями лета отсутствует. NDVI мелколиственных и широколиственных лесов положительно коррелирует со среднегодовой температурой. Метод множественной регрессии выявил взаимосвязь изменений NDVI лесов (мелколиственных и широколиственных) со среднегодовой температурой и годовым количеством осадков. Это объясняется тем, что летний NDVI лесов зависит от характеристик не только собственно лета, но и зимы (повреждение деревьев морозами, эффект “зимней засухи”) и весны (заморозки, засуха). Схожая закономерность зафиксирована в Волжском регионе [Шарый и др., 2020].

Таким образом, в Белорусском Полесье наиболее чувствительны к климатическим изменениям мелколиственные и широколиственные леса, продуктивность которых положительно реагирует на рост среднегодовой температуры и годового количества осадков.

Наличие положительного тренда NDVI указывает на рост продуктивности болот, связь которой с климатическими изменениями в пространственно-временном масштабе исследований не обнаружена. Вероятно, продуктивность болот, тестовые участки которых находятся в пределах особо охраняемых природных территорий, отражает глобальную тенденцию “озеленения”, обусловленную ростом содержания углекислого газа в атмосфере [Zhu et al., 2016].

Динамика NDVI пахотных земель Полесья существенно отличается от изменений этого показателя в природных лесных и болотных экосистемах: 1) в пахотных экосистемах отсутствует выраженный и статистически значимый тренд NDVI; 2) имеет место статистически достоверная отрицательная корреляция NDVI с температурой и положительная – с осадками. При этом исходя из полученных результатов корреляционного анализа и метода множественной регрессии влияние климатических характеристик на NDVI пахотных экосистем зависит от типа почв. Существенную роль для всех типов почв, кроме осушенных торфяно-болотных, играет летнее количество осадков, увеличение которого обуславливает рост NDVI, и наоборот. В случае осушенных торфяно-болотных почв влияние осадков на NDVI, вероятно, менее значимо. Отрицательная корреляция NDVI с температурными показателями, установленная для торфяно-болотных и дерново-подзолистых суглинистых почв (обладающих наибольшим плодородием по сравнению с другими почвенными разностями), возможно, обусловлена чувствительностью сельскохозяйственных культур, выращиваемых в регионе на этих типах почв, к отрицательным последствиям потепления климата.

Указанные результаты не противоречат данным других исследователей [Логинов и др., 2019; Лысенко, 2019], полученным на основе другого подхода и в другом пространственно-временном масштабе, согласно которым на 83 % территории Беларуси наблюдается рост NDVI (статистически значимый рост – 37 % площади). Однако на сельскохозяйственных землях климатические изменения привели к снижению NDVI, что авторы объясняют быстрым ростом температуры при практически неизменном количестве осадков в вегетационный период. Ведущим фактором многолетней динамики NDVI сельскохозяйственных земель предполагается количество осадков в вегетационный период. В работе С. А. Лысенко [2019] указывается, что низкое увлажнение на территории Белорусского Полесья в вегетационный период при потеплении климата способствует росту засушливости климата и должно негативно сказываться на биологической продуктивности экосистем.

Изменения климата имеют как положительные, так и отрицательные последствия для сельского хозяйства. Положительные – более ранняя весна и более продолжительный вегетационный период, улучшение условий перезимовки сельскохозяйственных культур и сеянных многолетних трав, менее частые зимы с опасной для озимых культур температурой, более долгий безморозный период, смещение сроков сева яровых культур на более раннее время, продвижение на север зоны выращивания теплолюбивых культур и т. д. Отрицательные – увеличение частоты экстремальных и неблагоприятных метеорологических условий, увеличение частоты и интенсивности засух, рост пожарной опасности в прилегающих к полям лесах и на торфяниках, дефицит воды в вегетационный период, снижение уровня грунтовых вод, рост экстремальных осадков, появление новых вредителей и болезней растений и т. д. В настоящее время в пахотных экосистемах Полесья влияние глобального роста содержания углекислого газа и положительных эффектов регионального потепления климата, вероятно, компенсируется его негативными последствиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполненные исследования показали, что лесные, болотные и пахотные экосистемы восточной части Белорусского Полесья различаются по своей реакции на глобальные климатические изменения.

Установлены статистически значимые положительные тренды NDVI в лесных и болотных экосистемах, вероятно, обусловленные действием комплекса факторов (рост содержания CO₂, увеличение вегетационного периода). В лесных и болотных экосистемах отсутствует достоверная корреляция NDVI со средней температурой лета и количеством летних осадков. Для мелколиственных и широколиственных лесов зафиксирована положительная корреляция NDVI со среднегодовой температурой.

В пахотных экосистемах отмечено отсутствие выраженного и статистически значимого тренда продуктивности при наличии статистически достоверной отрицательной корреляции NDVI с температурой и положительной – с осадками. При этом влияние кли-

матических характеристик на NDVI пахотных экосистем зависит от типа почв. Значительную роль для пахотных экосистем со всеми изученными типами почв, кроме осушенных торфяно-болотных, играет летнее количество осадков, увеличение которых обуславливает рост NDVI, и наоборот. Рост температуры при незначительном изменении осадков в летний сезон негативно влияет на продуктивность пахотных экосистем.

Исходя из вышеизложенного, наиболее чувствительны к дальнейшему потеплению климата пахотные экосистемы, продуктивность которых существенно лимитируется летними осадками, менее чувствительны лесные (особенно сосновые и смешанные леса) и болотные экосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

- Бровка Ю. А., Буяков И. В. Изменение гидротермического коэффициента и повторяемости экстремальных условий увлажнения на территории Беларуси в период потепления климата // Природопользование. 2020. № 2. С. 5–18.
- Виноградов В. В., Титкова Т. Б., Белоновская Е. А., Грачева Р. Г. Воздействие изменения климата на горные ландшафты Северного Кавказа // Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. С. 35–47.
- Гусев А. П. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) // Вестн. ВГУ. Серия. География. Геоэкология. 2020. № 1. С. 101–107. doi: 10.17308/geo.2020.1/2667
- Гусев А. П., Филончик Н. Н., Шпилевская Н. С. Многолетние тренды состояния растительности в природных и антропогенных ландшафтах Белорусского Полесья по данным MODIS (2000–2019) // Уч. зап. Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2020. Т. 6 (72), № 3. С. 200–209.
- Гусев А. П., Шпилевская Н. С., Филончик Н. Н. Нормализованный дифференцированный вегетационный индекс охраняемых ландшафтов юга Беларуси // Вестн. ВГУ. Серия. География. Геоэкология. 2021. № 2. С. 13–19. doi: 10.17308/geo.2021.2/3442
- Дронин Н. М., Тельнова Н. О., Калуцкова Н. Н. Анализ многолетних трендов продуктивности агроландшафтов юга Восточной Европы по материалам дистанционного зондирования // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2014. Т. 10, № 1. С. 529–538.
- Елсаков В. В., Кулюгина Е. Е., Шанов В. М. Тренды изменений растительного покрова Югорского полуострова последнего десятилетия: сопоставление результатов дистанционных и полевых исследований // Геоботан. картографирование. 2013. С. 93–111.
- Зуев В. В., Короткова Е. М., Павлинский А. В. Климатически обусловленные изменения растительного покрова тайги и тундры Западной Сибири в 1982–

- 2015 гг. по данным спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 66–76.
- Коломыйц Э. Г. Лесные экосистемы Волжского бассейна в условиях глобального потепления (локальный экологический прогноз) // Экология. 2009. № 1. С. 9–21. [Kolomyts E. G. Forest ecosystems of the volga basin under conditions of global climate warming: Local ecological prediction // *Rus. J. Ecol.* 2009. Vol. 40, N 1. P. 6–17.] doi: 10.1134/S 1067413609010020
- Коломыйц Э. Г., Розенберг Г. С., Шарая Л. С. Методы ландшафтной экологии в прогнозных оценках биотической регуляции углеродного цикла при глобальном потеплении // Экология. 2009. № 6. С. 403–410. [Kolomyts E. G., Rozenberg G. S., Sharaya L. S. Methods of landscape ecology in prognostic estimation of the biotic regulation of the carbon cycle under conditions of global climate warming // *Rus. J. Ecol.* 2009. Vol. 40. 379.] doi: 10.1134/S 1067413609060010
- Логинов В. Ф. Климатические условия Беларуси за период инструментальных наблюдений // Наука и инновации. 2016. № 9. С. 25–29.
- Логинов В. Ф., Лысенко С. А., Бондаренко Ю. А., Бровка Ю. А. Глобальные и региональные изменения климата и их связь с биопродуктивностью наземных экосистем // Природопользование. 2019. № 2. С. 20–31.
- Лысенко С. А. Климатообусловленные изменения биопродуктивности наземных экосистем Беларуси // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 77–88.
- Лысенко С. А., Логинов В. Ф., Бондаренко Ю. А. Взаимосвязь современных изменений испарения и количества осадков в южных регионах Беларуси // Природопользование. 2020. № 1. С. 20–29.
- Тельнова Н. О. Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агроэкосистем лесостепной и степной зон Северной Евразии // *Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса.* 2017. Т. 14, № 6. С. 97–107. doi: 10.21046/20707401201714697107
- Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Тертицкий Г. Н. Позеленение тундры как драйвер современной динамики арктической биоты // *Арктика: экология и экономика.* 2018. № 2 (30). С. 31–44.
- Тишков А. А., Белоновская Е. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Титова С. В., Царевская Н. Г., Шматова А. Г. Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // *Арктика: экология и экономика.* 2019. № 4 (36). С. 38–51.
- Шарый П. А., Шарая Л. С., Сидякина Л. В. Связь NDVI лесов и характеристик климата Волжского бассейна // *Соврем. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса.* 2020. Т. 17, № 4. С. 154–163. doi: 10.21046/207074012020174154163
- Юркевич И. Д., Голод Д. С., Адерихо В. С. Растительность Белоруссии, ее картографирование, охрана и использование. Минск: Наука и техника, 1979. 248 с.
- Bhatt U. S., Walker D. A., Raynolds M. K. et al. Recent Declines in Warming and Vegetation Greening Trends over Pan-Arctic Tundra // *Remote Sens.* 2013. N 5. P. 4229–4254. doi: 10.3390/rs5094229.
- Box E. O., Holben B. N., Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux // *Vegetatio.* 1989. Vol. 80. P. 71–89.
- Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A. Z., Schepaschenko D. G. Boreal forest health and global change // *Science.* 2015. Vol. 349, N 6250. P. 819–822.
- Yengoh G. T., Dent D., Olsson L., Tengberg A. E., Tucker C. J. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess land degradation at multiple scales: a review of the current status, future trends, and practical considerations. Lund University Centre for Sustainability Studies LUCSUS, 2014. 80 p.
- Zhou L., Tucker C. J., Kaufmann R. K., Slayback D., Shabanov N. V., Myneni R. B. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999 // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 20069–20083.
- Zhu Z., Piao S., Myneni R. B. et al. Greening of the Earth and its drivers // *Nat. Clim. Change.* 2016. Vol. 6. P. 791–795.

Influence of climate change on the productivity of ecosystems of the Belarusian Polesie based on remote sensing data

A. P. GUSEV

*F. Skorina Gomel State University
246019, Republic of Belarus, Gomel, Sovetskaya str., 104
E-mail: gusev@)gsu.by*

The results of the analysis of changes in the productivity of forest, bog and arable ecosystems in the eastern part of the Belarusian Polesye in 2000–2020 are presented. Satellite imagery (MODIS radiometer of the Terra satellite) was used. Ecosystem productivity was assessed according to the normalized difference vegetation index (NDVI). The correlation between changes in climatic indicators and NDVI has been studied. It was found that the studied ecosystems differ in response to climatic changes. Statistically significant positive NDVI trends were found for forest and bog ecosystems. A reliable correlation of this indicator with the average summer temperature and summer precipitation has not been established. Arable ecosystems are characterized by the absence of a statistically significant trend in productivity and a significant negative correlation of NDVI with temperature and a positive correlation with precipitation. The effect of climatic characteristics on the NDVI of arable ecosystems depends on their soil type.

Key words: ecosystems, climate change, NDVI, trend, Belarusian Polesie.