

Методом дисперсионного анализа установлено, что влияние радиационного фактора на формирование поглощенной дозы облучения лося европейского, обитающего на территории Полесского радиационно-экологического заповедника, оценивается в 20 % ($p = 0,004$). Полученные результаты позволяют оценить показатель благополучия данного объекта биоты, путем сравнения с величиной референтного уровня обеспокоенности.

Для представителей видов семейства *Cervidae* скрининговая величина определяется как $2,4 \cdot 10^{-4}$ Гр/сут. Сравнительный анализ показывает, что обитание лося европейского на территории зоны отселения обуславливает формирование 36,3 % от допустимой величины, в то время как обитание на территории зоны отчуждения превышает скрининговый показатель на 26,7 %.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что обитание лося европейского в условиях зоны отчуждения сохраняет опасность устойчивости для популяции данного вида. Особенности выведения ^{90}Sr опосредуют хроническое облучение ткани костного мозга, что может сопровождаться снижением устойчивости организма животного.

Список литературы

1. Гулаков, А.В. Динамика поглощенной дозы внутреннего облучения мышечной ткани дикого кабана от ^{137}Cs , обитающего в условиях Полесского радиационно-экологического заповедника / А.В. Гулаков Д.Н. Дроздов, // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2019. – № 6 (117). – С. 29–34.
2. Корнеев, Н.А. Основы радиоэкологии сельскохозяйственных животных / Н.А. Корнеев, А.Н. Сироткин. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 208 с.
3. Пикулик, М.М. Динамика зооценозов в условиях постантропогенных изменений ландшафтов в зоне аварии Чернобыльской АЭС / М.М. Пикулик, М.Е. Никифоров, А.Е. Пленин / Антропогенная динамика ландшафтов и проблемы их сохранения и устойчивого использования биологического разнообразия: Материалы респ. науч.–практ. конф., 26-28 дек., Минск, 2001. – Минск : БГПУ, 2002. – С.181–184.
4. Рожко, А.В. СИЧ-ориентированный метод оценки годовых доз внутреннего облучения населения в отдаленный период чернобыльской аварии / А.В. Рожко [и др.] // Радиация и Риск. – 2009. – Т. 18, N. 2. – С. 48–60.
5. Суценья, Л.М. Животный мир в зоне аварии Чернобыльской АЭС / М.М. Пикулик, А.Е. Пленин. – Минск: Навука і тэхніка, 1995. – 262 с.
6. ICRP Publication 91. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. Ann. ICRP. – 2003. – Vol. 33. – P. 21–75.
7. ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. Ann. ICRP. – 2009. – Vol. 38. – P. 1–242.

УДК 911.2+504.54

А. П. ГУСЕВ¹, В. Г. КРУПЯНКО¹, Н. Н. ФИЛОНЧИК²

ТРЕНДЫ NDVI ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ГЕОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

¹ УО «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины»,

г. Гомель, Республика Беларусь,

andi_gusev@mail.ru,

² Ланьчжоуский транспортный университет,

г. Ланьчжоу, Китайская Народная Республика,

filonchuk.mikalai@gmail.com

Климатические изменения – одна из наиболее злободневных и обсуждаемых экологических проблем современности, которой уделяется значительное количество разнообразных исследований, охватывающих в основном глобальный и региональный уровни.

Весьма чувствительны к изменениям климата геосистемы, которые расположены на границах природных зон (зональные геоэкотоны). Здесь могут возникать экологические проблемы, вызванные активизацией ряда негативных экологических процессов (обезлесивание, опустынивание, таяние вечной мерзлоты и некоторые другие). Важной и актуальной задачей является разработка системы экологических индикаторов на базе дистанционного зондирования Земли для прогноза неблагоприятных последствий климатических изменений. Одним из важнейших индикаторов состояния экосистемы служит нормализованный дифференцированный вегетационный индекс – *NDVI*, который рассчитывают по соотношению коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра [1, 2].

Цель представляемой работы – анализ многолетней динамики *NDVI* природных и антропогенных геосистем как реакции на глобальные изменения (на примере восточной части Белорусского Полесья). Задачи: анализ изменений климата региона в 2000–2022 годах; статистическая оценка трендов *NDVI* в ненарушенных и нарушенных лесных геосистемах, болотных и пахотных геосистемах; выяснение корреляции между *NDVI* и климатическими характеристиками; определение возможных причин динамики усредненных значений *NDVI*.

Объектами исследований являлись: ненарушенные лесные геосистемы (сосновые, широколиственные и мелколиственные леса без видимых следов повреждений); нарушенные лесные геосистемы (сосновые, широколиственные и мелколиственные леса, поврежденные пожарами, рубками, техногенными подтоплением, токсичными выбросами); болотные геосистемы; пахотные геосистемы.

Для получения значений *NDVI* использовался продукт *MOD13Q1* (обработанные результаты съемки сенсора *MODIS* спутника *Terra*). Для уточнения границ геосистем и их типа – космические снимки спутников *Landsat 8*. Атмосферная коррекция, привязка, дешифрирование космических снимков выполнялись в геоинформационной системе *QGIS 3.6*. Показатели климата (средняя температура лета, летнее количество осадков, средняя температура года, годовое количество осадков) определялись на основе данных метеостанций. Сведения о содержании *CO₂* были взяты с сайта *Global Monitoring Laboratory*. Изучение изменений *NDVI* и климатических показателей выполняли с помощью статистических методов: оценка точности подбора уравнения тренда – по коэффициенту детерминации (R^2); оценка статистической значимости коэффициента детерминации и уравнения тренда – по критериям Стьюдента и Фишера; оценки связи между изменениями *NDVI* и климатическими показателями – непараметрический корреляционный анализ (коэффициент ранговой корреляции Спирмена).

Проведенный нами анализ показал, что на метеостанциях полесского региона зафиксированы достоверные положительные тренды температур, но отсутствуют значимые изменения осадков. Установлено, что среднегодовая температура изменялась от 7,1 в 2003 г. до 9,7°C в 2020 г. (среднее значение в 2000-2022 гг. – 8,1°C). Коэффициент линейного тренда составил 0,057°C в год. Средняя температура лета колебалась от 17,6 в 2000 г. до 21,9°C в 2010 г. (среднее значение в 2000-2022 гг. – 19,3°C). Коэффициент линейного тренда – 0,08°C в год. Годовое количество осадков изменялось от 519 мм в 2015 г. до 847 мм в 2012 г. (средняя величина в 2000-2022 гг. – 653 мм/год). Летнее количество осадков в ландшафтах Полесья колебалось от 134 мм в 2015 г. до 332 мм в 2009 г. (средняя величина в 2000-2022 г. – 225 мм). Уравнения трендов для осадков статистически незначимы.

В течение рассматриваемого временного интервала в ненарушенных лесных геосистемах наблюдался статистически значимый рост *NDVI* (прирост составил 0,0021 в год, коэффициент детерминации $R^2=0,68$). В нарушенных лесных геосистемах величина *NDVI* колебалась без выраженной закономерности (рисунок 1). В болотных геосистемах имел место рост значений *NDVI* (0,0029 в год, $R^2=0,40$), а пахотных геосистемах, напротив, наблюдалось снижение величины *NDVI*, однако, статистически недостоверное (рисунок 2).

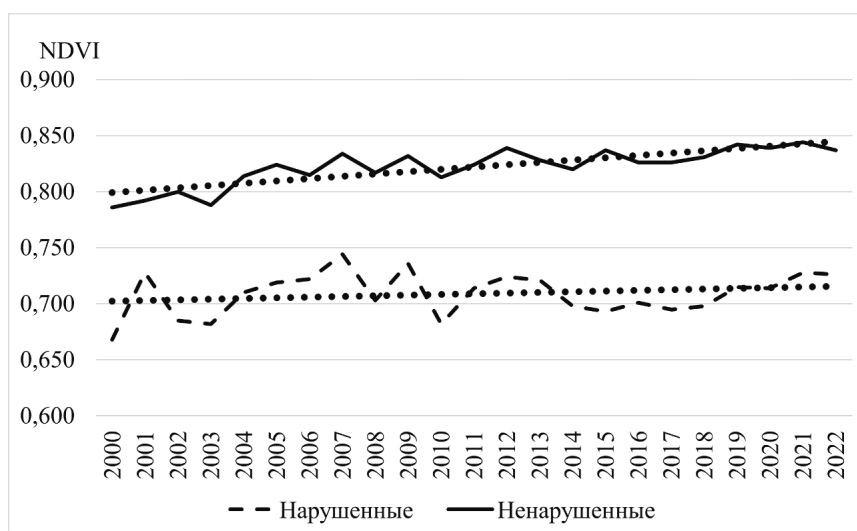


Рисунок 1 – Динамика NDVI в лесных геосистемах в 2000–2022 гг. (линии тренда показаны точками) (составлено авторами)

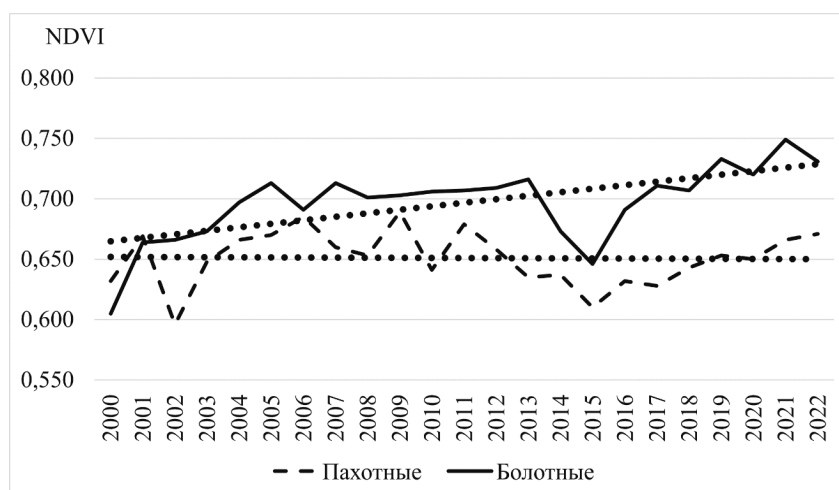


Рисунок 2 – Динамика NDVI в болотных и пахотных геосистемах в 2000–2022 гг. (линии тренда показаны точками) (составлено авторами)

Каковы же вероятные причины выявленных изменений *NDVI* и соответственно продуктивности экосистем? Известно, что основными факторами, обуславливающими наблюдаемые нами в регионе тренды *NDVI*, могут являться: трансформация структуры землепользования; климатические колебания (например, рост температур); увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, которое благоприятствует фотосинтезу (вызывает «*fertilization effect*»). Влияние трансформации структуры землепользования нами были исключены заранее подбором тестовых участков (ведущий критерий – отсутствие существенных изменения структуры земель в 2000–2022 гг.). Для выяснения влияния на *NDVI* изменений климатических показателей и содержания углекислого газа был выполнен корреляционный анализ.

В ненарушенных лесных геосистемах *NDVI* положительно коррелирует со среднегодовой и летней температурами, а наиболее тесная связь наблюдается с содержанием CO_2 . Потепление положительно сказывается на *NDVI* лесов за счет увеличения вегетационного периода, снижения риска повреждения деревьев морозами и снегопадами зимой. Следует отметить также положительное влияние роста концентрации углекислого газа в атмосфере на фотосинтез ненарушенной лесной растительности Полесья.

В нарушенных лесных геосистемах статистически достоверная корреляция с каким-либо из рассматриваемых показателей отсутствует. Однако, наибольшую величину имеют коэффициенты корреляции годовыми и летними осадками. Вероятно, колебания *NDVI* в нарушенных лесах обусловлены в первую очередь динамикой нарушающих факторов, но чувствительны к осадкам.

В болотных экосистемах *NDVI* не имеет статистически достоверной корреляции с климатическими показателями, но положительно коррелирует с содержанием углекислого газа (коэффициент корреляции составил +0,65 при $p < 0,001$)

В пахотных геосистемах колебания *NDVI* достоверно коррелируют только с величиной летних осадков (коэффициент корреляции составил +0,57 при $p < 0,005$). С другими климатическими показателями значения коэффициентов корреляции недостоверны. Вероятно, что именно в пахотных геосистемах в сильной мере сказываются отрицательные эффекты колебаний климата: рост частоты экстремальных и неблагоприятных метеорологических условий, рост частоты и интенсивности засух, увеличение пожарной опасности в прилегающих к полям лесах и на торфяниках, дефицит воды в вегетационный период, падение уровня грунтовых вод, увеличение экстремальных осадков, инвазии чужеродных вредителей и болезней растений [3, 4]. В пахотных геосистемах положительный эффект увеличения вегетационного сезона скрадывается негативными последствиями увеличения засушливости климата (рост температур при незначительных колебаниях количества осадков).

Таким образом, на уровне локальных геосистем наблюдается неоднородная реакция их различных типов на воздействие одного и того же фактора. Из полученных результатов видно, что положительное влияние роста теплообеспеченности и содержания углекислого газа в атмосфере на *NDVI* характерно только для природных геосистем – болотных и ненарушенных лесных. В нарушенных лесных и сельскохозяйственных (пахотных) геосистемах положительное влияние роста содержания углекислого газа, вероятно, не проявляется, поскольку более значительное воздействие оказывает негативные последствия, обусловленные снижением влагообеспеченности. Продуктивность пахотных геосистем в наибольшей степени чувствительна к количеству летних осадков.

Установленные закономерности следует учитывать при прогнозировании реакций геосистем на изменения климата, а также при разработке климато-адаптационных мероприятий [3].

Исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № X23КИ-022).

Список литературы

1. Гусев, А.П. Изменения *NDVI* как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) / А.П. Гусев // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2020. – №1. – С. 101–107.
2. Гусев, А.П. *NDVI* как индикатор климатогенных реакций геосистем (на примере юго-востока Беларуси) / А.П. Гусев // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46. – №2. – С. 200–209.
3. Гусев, А.П. Оценка риска негативных климатогенных реакций полесских ландшафтов / А.П. Гусев // Российский журнал прикладной экологии. – 2022. – №4. – С. 13–19.
4. Данилович, И.С. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причина, следствия, прогнозы / И.С. Данилович, В.И. Мельник, ЮБ. Гейер // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2020. – №1. – С. 3–13.