

в условиях жёстких экологических ограничений и сохранения уникальной экосистемы / Н.М. Чернышов // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2013. – № 2. – С. 95–105.

2. Бударина, В.А. Экологические аспекты горнодобывающей и перерабатывающей деятельности при разработке Еланского месторождения сульфидных медно-никелевых руд. Монография / В.А. Бударина, И.И. Косинова, Ю.А. Капустина. – М. : Научная книга, 2022. – 141 с.

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF MINING AREAS FOR THE EXTRACTION AND PROCESSING OF NON-FERROUS METAL ORES

V. A. BUDARINA¹, I. I. KOSINOVA¹, A. G. ARONOV², G. A. ARONOV²,
V. L. MOLYARENKO³

kosinova777@yandex.ru

¹*FBGEI HE Voronezh State University,
Voronezh, Russia,
aronovg@tut.by*

²*Centre of Geophysical Monitoring of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus,
molyarenko-vova@bk.ru*

³*Gomel State University named after F. Skorina,
Gomel, Belarus*

Annotation. *An assessment of the environmental aspects formed during the possible development of the Yelan-Elkin sulfide deposit of copper-nickel ores, located within the Novokhopersky megablock of the Voronezh crystalline array VKM, was made. The life cycle of products is built, including the levels of exploration, production, processing and transportation of raw materials. The general regularities of the distribution of heavy metals to productive rocks and overburden rocks are presented. The presence, in addition to the main ore-forming elements (Ni, Cu and Co), of a significant proportion of associated toxic (As, Sb, Bi and Pb) components is indicated.*

Key words: *ecological, aspect, mining, industry, processing, life cycle, ores, non-ferrous metals.*

УДК 574.4+551.583+504.064.37

NDVI КАК ИНДИКАТОР АНТРОПОГЕННОЙ ДИНАМИКИ ЛОКАЛЬНЫХ ГЕОСИСТЕМ

А. П. ГУСЕВ, В. Г. КРУПЯНКО

andi_gusev@mail.ru

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины,
г. Гомель, Беларусь*

Аннотация. *Цель работы – изучение изменений NDVI как индикаторов антропогенных процессов в локальных геосистемах. Задачи исследований: 1) изучение временных трендов климатических показателей и NDVI локальных геосистем в 2000 – 2020 гг. 2) выяснение закономерностей изменений NDVI в различных геосистемах (лесных ненарушенных и нарушенных, болотных, пахотных, постпахотных, техногенных); 3) оценка связи*

NDVI с показателями растительного покрова и климатическими характеристиками. Изучены особенности динамики растительного покрова в техногенных геосистемах.

Ключевые слова: динамика, индикаторы, геосистемы, техногенные, NDVI, тренд, Беларусь.

Важную роль в изучении антропогенных изменений геосистем играет дистанционное зондирование Земли. Колебания климата, экзогенные геологические процессы, техногенное преобразование рельефа, землепользование приводят к изменениям спектрально-отражательных свойств земной поверхности. Для картографирования и мониторинга этих процессов широко используются спектральные индексы, представляющие собой показатели, которые рассчитываются в результате математических операций с разными спектральными каналами. Наиболее широко используемый для решения широкого круга задач спектральный индекс – *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), который рассчитывается 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 [1]. Во многочисленных исследованиях установлена корреляция *NDVI* с первичной чистой и валовой продукцией, зеленой фитомассой [1, 2], что позволяет использовать этот индекс как индикатор продуктивности и устойчивости геосистем.

Цель работы – изучение изменений *NDVI* как индикаторы антропогенных процессов в локальных геосистемах. В ходе выполнения решались следующие задачи: 1) изучение временных трендов климатических показателей и *NDVI* локальных геосистем в 2000-2020 гг. 2) выяснение закономерностей изменений *NDVI* в различных геосистемах (лесных ненарушенных и нарушенных, болотных, пахотных, постпахотных, техногенных); 3) оценка связи *NDVI* с показателями растительного покрова и климатическими характеристиками.

Исследования выполнялись на юго-востоке Беларуси, который по ландшафтному районированию относится к восточной части Полесской провинции. Природные геосистемы представлены сосновыми, березовыми, осиновыми, черноольховыми, широколиственными и смешанными лесами, верховыми, переходными и низинными болотами. Значительная часть территории (более 50%) занимают антропогенные геосистемы (пашни, пастбища и сенокосы, водохранилища, застроенные и нарушенные земли).

Объектами исследований являлись:

- лесные (ненарушенные) геосистемы – сосновые, смешанные, мелколиственные и широколиственные леса (54 тестовых участка, общей площадью 134,6 км²);
- лесные (нарушенные) геосистемы (санитарные и другие рубки, пожары, рекреация, воздействие выбросов, деградация древостоя при техногенном подтоплении (7 участков, 3,73 км²).
- болотные геосистемы (ненарушенные) – низинные и верховые болота (7 тестовых участков, 510 км²);
- пахотные геосистемы – пахотные земли (104 тестовых участка, 932,4 км²).
- постпахотные геосистемы, в которых происходили либо восстановительные сукцессии после выведения их из оборота, либо, наоборот, застройка и связанные с ней техногенные преобразования (4 участка, 9,82 км²);
- техногенные геосистемы – 4 гидротехнических системы (водохранилища), 4 карьера по добыче строительных материалов, 3 массива намывных грунтов с городской застройкой (11 участков, 189,1 км²).

Для уточнения состояния растительного покрова тестовых участков использованы результаты космической съемки спутников *Landsat 4-5 TM* (2000-2010 гг.) и *Sentinel-2 MSI* (2017 – 2020 гг.).

Изучаемый временной интервал – 2000 – 2020 гг. Значения *NDVI* были взяты из *MOD13Q1* (обработанные результаты съемки сенсора *MODIS* спутника *Terra*), который представляет собой растр максимальных значений *NDVI* за 16 суток. Пространственное разрешение 250 м. Для устранения влияния сезонных колебаний *NDVI* для анализа использовали только летние композиты.

Обработка и дешифрирование космических снимков *Landsat 4-5* и *Sentinel-2*, создание векторного слоя тестовых участков, зональная статистика по композитам *MOD13Q1* выполняли в геоинформационной системе *QGIS 3.14*.

Климатические показатели (средняя температура лета, летнее количество осадков, средняя температура года, годовое количество осадков) определяли на основе данных по 6 метеостанциям, расположенным в пределах региона.

Изучение динамики климатических показателей и *NDVI* проводили с помощью статистических методов. Для оценки точности подбора уравнения тренда использовали коэффициент детерминации (R^2). Статистическую значимость коэффициента детерминации и уравнения тренда оценивали с помощью критерия Фишера. Для оценки связи между изменениями *NDVI* и климатическими показателями использованы непараметрический корреляционный анализ (рассчитывался коэффициент ранговой корреляции Спирмена) и метод множественной регрессии. Для статистического анализа применяли программу *STATISTICA 6.0*.

Изучение изменений *NDVI* в геосистемах региона в период 2000 – 2020 гг. показало следующее. Средние по региону летние *NDVI* лесных геосистем колебались в пределах 0,774 – 0,822. Эти изменения характеризуются статистически значимым линейным трендом – увеличение *NDVI* на 0,0015 в год (при $R^2=0,43$). В болотных геосистемах средние значения *NDVI* изменялись в интервале 0,603 – 0,733. Здесь также наблюдался статистически значимый положительный тренд (коэффициент тренда – 0,0031 в год, $R^2=0,38$). В пахотных геосистемах средние значения *NDVI* для региона в целом изменялись от 0,596 до 0,688, при этом статистически значимый тренд отсутствовал, что объясняется зависимостью продуктивности данного типа геосистем от значительного числа факторов – особенностей севооборота, технологий обработки, характера эксплуатации угодий и т.д.

В гидротехнических системах изменения *NDVI* отражают колебания глубины и площади водоема, уменьшение которых сопровождается зарастанием мелководий и берегов растительностью. Так, закачка воды в Днепровско-Брагинское водохранилище и резкое снижение его площади выразилось в изменении значений *NDVI* с 0,1-0,2 до 0,5-0,7 в течении 2017 – 2020 гг. Более длительный и плавный процесс пересыхания Светлогорского водохранилища отразился в повышении *NDVI* с 0,4 – 0,5 до 0,6 – 0,7 (линейный тренд с коэффициентом 0,007 в год). Колебания площади и уровне озера Червоное и Михайловского водохранилища носили более сложный характер, но также отражались в изменениях *NDVI*.

Изменения растительного покрова в карьерных геосистемах имеют следующие закономерности. Карьер по добычи песков «Сожский» начал разрабатываться на месте пойменных лугов с 2007 г., что фиксируется в резком падении значений *NDVI* с 0,6 – 0,7 до 0,4 – 0,5. В карьере по добыче песков «Осовцы», напротив, разработка прекратилась в 2006-2007 гг., что отразилось в увеличении *NDVI* по мере зарастания склонов травянистой и древесно-кустарниковой растительностью (с 0,3 – 0,4 до 0,5 – 0,6). Эти изменения *NDVI* описываются уравнением линейного тренда с коэффициентом 0,0125 ($R^2=0,83$). На территории карьера по добыче стекольных песков «Ленино» существенных изменений соотношения поверхностей, лишенных растительности и с растительным покровом, в 2000 – 2020 гг. не наблюдалось, что отражается в колебаниях *NDVI* в сравнительно узком диапазоне 0,4 – 0,5. Аналогичная ситуация имеет место на территории карьера по добычи строительного камня «Глушковичи» (колебания *NDVI* в диапазоне 0,5 – 0,6).

Намывные массивы «Мельников Луг» и «Шведская Горка» были созданы в 1980-х гг. с целью расширения городского строительства в пойменном ландшафте реки Сож. В течение 1990-х и начала 2000-х гг. в их пределах развивались сукцессии растительности, в ходе которых сформировался разреженный растительный покров. С 2000-х гг. постепенно происходило застраивание намывного массива «Мельников Луг» ($NDVI=0,3 - 0,4$). Максимум развития растительного покрова на массиве «Шведская Горка» приходится на 2008 – 2014 гг. ($NDVI=0,4 - 0,5$). Начало активной застройки 2015 г. – $NDVI>0,3$. Осушенный массив «Южный» в период 2000 – 2009 гг. зарос травянистой и кустарниковой растительностью ($NDVI=0,6 - 0,7$). Начало активной застройки – 2010 г., когда значения $NDVI$ резко снизились до 0,4.

Для изучения связи между $NDVI$ и климатическими показателями были применены корреляционный анализ, результаты которых приведены соответственно таблице 1.

Таблица 1 – Корреляция $NDVI$ с климатическими показателями в геосистемах, не испытывающих нарушений или смены землепользования (коэффициент ранговой корреляции Спирмена)

Геосистемы	Климатические показатели			
	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, $p<0,01$

Н.д. – значения коэффициента корреляции недостоверны, $p>0,05$

Видно, что статистически достоверная корреляция между $NDVI$ лесных геосистем и климатическими показателями лета отсутствует. $NDVI$ лесных геосистем положительно коррелирует со среднегодовой температурой (коэффициент корреляции Спирмена 0,27, $p<0,05$) и годовым количеством осадков (0,55, $p<0,001$). Для болотных геосистем статистически значимой связи $NDVI$ с климатическими показателями не установлено.

Положительный тренд $NDVI$ в лесных и болотных геосистемах может быть обусловлен двумя основными факторами: потеплением климата (например, благоприятно влияет на продуктивность увеличение вегетационного периода) и ростом содержания CO_2 в атмосфере (способствует фотосинтезу) [3]. Так, взаимосвязь изменений $NDVI$ лесных ненарушенных геосистем со среднегодовой температурой и годовым количеством осадков объясняется тем, что летний $NDVI$ лесов зависит не только от характеристик собственно летнего периода, но и от характеристик зимы и весны (повреждение деревьев морозами, эффект «зимней засухи», весенние заморозки, весенняя засуха). Наличие положительного тренда $NDVI$ указывает на рост продуктивности болот, связь которой с климатическими изменениями в пространственно-временном масштабе исследований не обнаружена. Вероятно, продуктивность ненарушенных болот, тестовые участки которых находятся в пределах особо охраняемых природных территорий, отражает глобальную тенденцию «озеленения», вызванную увеличением содержания CO_2 в атмосфере [3].

Корреляционный анализ показал, что $NDVI$ пахотных геосистем достоверно коррелирует с климатическими показателями, при этом с температурами – отрицательно, а с осадками – положительно (таблица 1). Корреляционная связь $NDVI$ с климатическими показателями установлена для пахотных геосистем независимо от возраста их эксплуатации. $NDVI$ пахотных геосистем на осушенных болотах коррелирует только с температурами, корреляция с осадками – недостоверна. Динамика $NDVI$ пахотных геосистем существенно отличается от изменений этого показателя в природных лесных и болотных

геосистемах. Так, отсутствует выраженный и статистически значимый тренд *NDVI*. Кроме того, имеет место статистически достоверная отрицательная корреляция *NDVI* с температурой и положительная корреляция *NDVI* с осадками.

Постпахотные, лесные нарушенные и техногенные геосистемы в течение 2000 – 2020 гг. испытывали значительные изменения, вызванные восстановительными или дигрессивными процессами, которые можно оценить по проективному покрытию травяной и древесно-кустарниковой растительности. Для таких геосистем наблюдается тесная положительная корреляция между *NDVI* и величиной проективного покрытия растительности (таблица 2). В заброшенных пахотных геосистемах по мере восстановления растительного покрова значения *NDVI* увеличиваются, при застройке пахотных угодий, наоборот, – снижаются [4]. Указанные закономерности подтверждаются на региональном уровне при анализе родов ландшафтов [4,5,6].

Видно, что в техногенных геосистемах колебания *NDVI* находятся в тесной связи с изменениями проективного покрытия травяной и древесно-кустарниковой растительности. При этом значения коэффициента корреляции между *NDVI* и проективным покрытием больше 0,9 (т.е. тесная корреляция). Климатические показатели на динамику *NDVI* в техногенных геосистемах не влияют (корреляция недостоверна). В лесных нарушенных геосистемах рост проективного покрытия травяной растительности индицирует их деградацию (так как происходит снижение сомкнутости древостоя и рост площади вырубок, гарей, полян) и соответственно снижение *NDVI*.

Таблица 2 – Корреляция *NDVI* с показателями растительного покрова и климата в локальных геосистемах, испытывающих восстановительные или дигрессивные смены (коэффициент ранговой корреляции Спирмена)

Геосистемы	ППТР*, %	ППДР**, %	Климатические показатели			
			Средняя температура лета, °С	Летнее кол-во осадков, мм	Среднегодовая температура, °С	Годовое кол-во осадков, мм
Постпахотные	0,670, p<0,0001	0,804, p<0,0001	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Техногенные	0,920, p<0,0001	0,922, p<0,0001	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.
Лесные нарушенные	-0,658, p<0,0001	0,680, p<0,0001	Н. д.	Н. д.	Н. д.	Н. д.

*ППТР – проективное покрытие травяной растительности; **ППДР – проективное покрытие древесно-кустарниковой растительности; Н.д. – значения статистически недостоверны (p>0,05).

С другой стороны, увеличение проективного покрытия древесно-кустарниковой растительности и снижение проективного покрытия травяной растительности ведет росту значений *NDVI* (значения *NDVI* для древесно-кустарниковой растительности составляют 0,7 – 0,8, а для травянистой – 0,5 – 0,7). С климатическими показателями в таких геосистемах статистически достоверная корреляция *NDVI* отсутствует.

Таким образом, выполненные исследования показали, что продуктивность локальных геосистем, диагностируемая по *NDVI*, является чутким индикатором, протекающих в них природных и антропогенных процессов. В геосистемах, для которых характерно отсутствие существенных нарушений или резких изменений землепользования, динамика *NDVI* обусловлена действием климатических факторов и дифференцирована в зависимости от типа геосистемы и особенностей растительности. Наиболее значения

изменения климата имеют для продуктивности пахотных геосистем. При потеплении климата их продуктивность в сильной степени лимитируется летними осадками. В меньшей степени от динамики климатических показателей зависит продуктивность лесных ненарушенных и болотных геосистем.

В геосистемах, испытывающих восстановительную или дигрессивную динамику под воздействием антропогенных процессов, главным фактором, обуславливающих изменения *NDVI*, являются колебания проективного покрытия травяной и древесно-кустарниковой растительности. Действие на продуктивность таких геосистем климатических факторов маскируется более существенным влиянием процессов, связанных с ростом или снижением антропогенной нагрузки.

Список литературы

1. Yengoh G.T., Dent D., Olsson L., Tengberg A.E., Tucker C.J. 2014. 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.
2. Raynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A. *NDVI* patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic // Remote Sensing of Environment. – 2006. – V.102. – P. 271–281.
3. Zhu Z., Piao S., Мyneni R.B. et al. Greening of the Earth and its drivers // Nature climate change. – 2016. – V. 6. – P. 791–795.
4. Гусев, А.П. 2020. Изменения *NDVI* как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) / А.П. Гусев // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. – 2020. – № 1. – С. 101–107.
5. Гусев, А.П. Многолетние тренды состояния растительности в природных и антропогенных ландшафтах Белорусского Полесья по данным MODIS (2000-2019) / А.П. Гусев, Н.Н. Филончик, Н.С. Шпилевская // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2020. – № 6. – С. 200–209.
6. Гусев, А.П. Нормализованный дифференцированный вегетационный индекс охраняемых ландшафтов юга Беларуси / А.П. Гусев, Н.Н. Филончик, Н.С. Шпилевская // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. – 2021. – № 2. – С. 13–19.

NDVI AS AN INDICATOR OF THE ANTHROPOGENIC DYNAMICS OF LOCAL GEOSYSTEMS

A. P. GUSEV, V. G. KRUPYANKO

andi_gusev@mail.ru

*F. Skorina Gomel State University,
Gomel, Republic of Belarus*

Abstract. *The purpose of this work is to study changes in NDVI as indicators of anthropogenic processes in local geosystems. Research objectives: 1) study of temporal trends of climatic indicators and NDVI of local geosystems in 2000-2020. 2) elucidation of patterns of changes in NDVI in various geosystems (forest undisturbed and disturbed, swamp, arable, post-arable, technogenic); 3) assessment of the relationship of NDVI with vegetation cover and climatic characteristics. The features of vegetation dynamics in technogenic geosystems have been studied.*

Key words: *dynamics, indicators, geosystems, technogenic, NDVI, trend, Belarus.*