

УДК 911.1+577.4+581.5

А. П. Гусев

**Многолетние изменения вегетационных
индексов как индикатор динамики состояния
природных и антропогенных геосистем**

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь
e-mail: andi_gusev@mail.ru

Аннотация. Цель работы — анализ многолетних изменений вегетационных индексов как индикаторов антропогенной динамики состояния геосистем. В работе использованы космические снимки Landsat 1984–2020 гг. Обработка снимков и расчет вегетационных индексов (NDVI, NBR, SWVI) выполнены в программе QGIS. Изучена многолетняя динамика вегетационных индексов в лесных, сельскохозяйственных и техногенных геосистемах. Статистический анализ показал, что в природных и антропогенных (сельскохозяйственных и техногенных) геосистемах значения вегетационных индексов зависят от проективного покрытия древесной и травянистой растительности; в лесных геосистемах на динамику вегетационных индексов оказывают влияние также климатические факторы; наиболее чувствительным к изменениям климатических параметров из рассмотренных индексов является SWVI.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, индикатор, вегетационные индексы, растительный покров, геосистема

Введение

Вегетационные индексы, рассчитываемые на основе данных многозональной космической съемки, широко используются для решения различных геоэкологических задач — оценки состояния лесных экосистем и целых ландшафтов [1–3], мониторинга и картографирования пожаров [4, 5], изучения техногенного химического воздействия на растительный покров [6, 7], оценки урожайности сельскохозяйственных угодий [8] и других. Наиболее часто применяются такие индексы, как NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который служит количественным показателем фотосинтетически активной биомассы [1, 9]; NBR (Normalized Burn Ratio) и SWVI (Short Wave Vegetation Index), чувствительные к содержанию влаги в растениях и отражающие стрессовое состояние растительности [10, 11].

Многозональная космическая съемка семейством спутников Landsat проводится с 1972 г. по настоящее время, на основе чего, сформирована уникальная база данных, которую можно использовать для изучения многолетних изменений вегетационных индексов в экосистемах и ландшафтах различных природных зон [1]. Основным недостатком съемки спутниками Landsat является ее временное разрешение — 1 раз в 16 суток (так, в результате в течение летнего сезона можно отобрать только несколько безоблачных снимков, которые могут попасть на аномальные метеоусловия и тем самым исказить характеристику всего лета). Известно, что значения вегетационных индексов зависят от колебаний метеорологических и климатических факторов [1, 12], что затрудняет выделять во

временных рядах изменения, обусловленные воздействием других факторов — пожаров, вырубок и т.д., особенно если они не имеют широкого пространственного охвата.

Цель работы — анализ многолетних изменений вегетационных индексов как индикаторов антропогенной динамики состояния геосистем локального уровня. Решались следующие задачи: на основе космических снимков вычисление вегетационных индексов, проективного покрытия древесной и травянистой растительности для тестовых участков, представляющих лесные, сельскохозяйственные и техногенные геосистемы для каждого временного среза; выяснение закономерности многолетних изменений вегетационных индексов, растительного покрова и климатических показателей в изучаемых геосистемах (1984–2020 гг.); установление факторов, воздействующих на динамику вегетационных индексов методами статистического анализа.

Материал и методы

Район исследований находится на юго-востоке Беларуси (восточная часть Белорусского Полесья). Объектом исследований являлись природные и антропогенные геосистемы локального уровня:

лесные геосистемы (сосновые и широколиственные леса — как нарушенные, так и ненарушенные);

сельскохозяйственные геосистемы (пахотные угодья — эксплуатируемые и выведенные из оборота);

техногенные геосистемы (микрорайоны города на намывных массивах, на осушенном массиве, заброшенный населенный пункт Бартоломеевка, заброшенный военный аэродром).

Площади тестовых участков для изучения многолетней динамики вегетационных индексов в данных объектах составляют от 0,27 до 6,87 км².

Материалы космических съемок спутников семейства Landsat находятся в свободном доступе на сайте <https://earthexplorer.usgs.gov//>. Использованы космические снимки спутников Landsat 4-5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI в период 1984–2020 гг. (всего 24 снимка). Пространственное разрешение 30 м. Критерии отбора снимков: период съемки июль-август; облачностью менее 10%. Для уточнения карт растительного покрова привлекались материалы сервисов Google Earth, OpenStreetMap. Атмосферная коррекция, привязка, оцифровка космоснимков, расчет вегетационных индексов выполнены в QGIS 3.6.

В работе использованы вегетационные индексы, рассчитываемые по формулам, приведенным в табл. 1.

В качестве факторов, влияющих на спектрально-отражательные свойства земной поверхности и, соответственно, на значения вегетационных индексов, были рассмотрены: средняя температура и количество осадков в месяц съемки (база данных метеостанции Гомель — <http://www.pogodaiklimat.ru/history>), проективное покрытие травянистой растительности, проективное покрытие древесной растительности (определялись на основе визуального дешифрирования космических снимков для каждого участка). На основе комбинаций каналов определялись среднее значение и среднеквадратичное отклонение NDVI, NBR, SWVI.

Статистический анализ выполнялся с помощью программы STATISTICA 6.0.

Таблица 1

Характеристика используемых вегетационных индексов

Вегетационный индекс	Формула для расчета на основе каналов спутников Landsat 4–5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat 8 OLI
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(NIR - R)/(NIR + R)$
NBR (Normalized Burn Ratio)	$(NIR - SWIR2)/(NIR + SWIR2)$
SWVI (Short Wave Vegetation Index)	$(NIR - SWIR1)/(NIR + SWIR1)$

Примечание. Каналы: NIR — ближний инфракрасный (0,85–0,88 мкм); R — красный (0,63–0,68 мкм); SWIR2 — коротковолновой инфракрасный (2,1–2,3 мкм); SWIR1 — коротковолновой инфракрасный (1,56–1,66 мкм).

Результаты и их обсуждение

Лесные геосистемы характеризуются наиболее высокими значениями вегетационных индексов в летний период ($NDVI > 0,6$; $NBR > 0,4$; $SWVI > 0,3$). Антропогенное воздействие (пожары, рубки) вызывает снижение значений указанных индексов. Так, сплошные рубки, обусловленные повреждениями древостоя короедом-типографом, на одном из тестовых участков вызвали снижение NDVI в 1,5 раза, NBR и SWVI в 2 раза. Повреждение сосновых лесов выбросами в зоне влияния Гомельского химического завода привело к многолетнему уменьшению данных индексов в 1,2–1,4 раза по сравнению с фоновыми лесами [6].

Чутким индикатором состояния может служить стандартное отклонение значений вегетационных индексов. Так, среднемноголетнее значение стандартного отклонения NDVI для фоновых сосновых лесов составляет 0,03, для широколиственных — 0,01. В нарушенных сосновых лесах этот показатель в зависимости от тестового участка находится в пределах от 0,06 до 0,15, в нарушенных широколиственных лесах — 0,04–0,06. Среднемноголетнее значение стандартного отклонения NBR для фоновых сосновых лесов составляет 0,03, для широколиственных лесов — 0,02. В нарушенных сосновых лесах этот показатель в зависимости от тестового участка находится в пределах от 0,08 до 0,16, в нарушенных широколиственных лесах — 0,05–0,06. Наибольшее значение стандартного отклонения NBR наблюдалось в сосновых лесах, подверженных выборочным рубкам, — 0,15–0,2. Среднемноголетнее значение стандартного отклонения SWVI для фоновых сосновых лесов составляет 0,025, для широколиственных лесов — 0,02. В нарушенных сосновых лесах этот показатель в зависимости от тестового участка находится в пределах от 0,06 до 0,09, в нарушенных широколиственных лесах — 0,05. Наибольшее значение стандартного отклонения SWVI наблюдалось в сосновых лесах, подверженных выборочным рубкам, — 0,10–0,16. Рост стандартного отклонения значений вегетационных индексов при антропогенном воздействии объясняется формированием в пределах лесной геосистемы участков с поврежденным древостоем и дефолиацией, прогалин, полян, вырубков, т. е. проявлениями фрагментации

древесного яруса, от которого зависят спектрально-отражательные свойства лесного покрова.

Сельскохозяйственные геосистемы характеризуются значительными колебаниями вегетационных индексов, которые обусловлены целым комплексом причин: циклы сельскохозяйственных работ, смена выращиваемых культур, прекращение и возобновление сельскохозяйственного использования. Поэтому для этих объектов наблюдается высокая пространственно-временная вариабельность значений вегетационных индексов. Значительные колебания величин индексов по времени могут быть обусловлены динамикой сельскохозяйственных работ: снимки Landsat сделаны в разные годы могут приходиться на разные этапы сельскохозяйственного цикла.

Для всех изученных сельскохозяйственных геосистем типичны относительно высокие значения стандартного отклонения значений вегетационных индексов (0,05–0,2). На одном из тестовых участков колебания значений вегетационных индексов были обусловлены особенностями эксплуатации: в середине 2000-х на залежах развивалась восстановительная сукцессия (NDVI возрос до 0,82 в 2016 г.), а в 2017 г. участок стал застраиваться (NDVI снизился до 0,3). По индексам NBR и SWVI также четко фиксируется начало застройки участка в 2017–2020 гг.: значения NBR снизились с 0,4–0,6 до 0,05; SWVI — с 0,2–0,3 до отрицательных значений.

Для техногенных геосистем также характерны высокая вариабельность значений вегетационных индексов, обусловленная неоднородностью растительного покрова, что выражается в величинах стандартного отклонения — 0,1–0,2. Многолетняя динамика индексов отражают особенности техногенного преобразования и изменения растительного покрова указанных объектов.

Так, для микрорайона «Мельников Луг» до 2000-х NBR имел отрицательные значения, в 2002–2020 гг. немного увеличивается до 0,1–0,15, что, вероятно, обусловлено ростом озелененности новостроек; SWVI в течение почти всего периода наблюдения имеет отрицательные значения. Создание намывного массива для микрорайона «Шведская горка» на месте пойменных лугов отражается в снижении NBR и SWVI, начиная с 1990-х годов, с положительных (соответственно 0,3–0,6 и 0,1–0,3) до отрицательных значений. В заброшенном населенной пункте Бартоломеевка наблюдается поступательное увеличение средних значений NBR и SWVI во времени. За 1984–2020 гг. величина NBR выросла в 2,4 раза, величина SWVI — в 3,2 раза. В целом, NBR и SWVI по сравнению с NDVI более контрастно реагируют как на рост техногенного преобразования, так и на восстановление растительного покрова.

В целом интерпретация многолетних изменений вегетационных индексов, рассчитываемых на основе съемки спутников Landsat и Sentinel требует обязательно привлечения дополнительных материалов, полученных с помощью наземных наблюдений.

Для выявления факторов, воздействующих на динамику вегетационных индексов, был выполнен статический анализ методом множественной регрессии. В качестве независимых факторов выступали средняя температура и количество осадков в месяц съемки, проективное покрытие травянистой растительности, проективное покрытие древесной растительности. Анализ проводится отдельно для лесных, сельскохозяйственных и техногенных геосистем. Полученные

уравнения множественной регрессии и их характеристики (коэффициент детерминации — R^2 и критерий Фишера — F) приведены в табл. 2.

Видно, что в лесных геосистемах значения NDVI и NBR зависят от покрытия растительности и от средней температуры месяца. Причем, на NBR покрытие травяной растительности оказывает отрицательное влияние. На значения SWVI лесных геосистем оказывают влияние все четыре фактора: положительное — температура, осадки, покрытие древесной растительности; отрицательное — покрытие травянистой растительности. Значения коэффициентов детерминации в случае лесных геосистем наиболее низкие, особенно для NDVI ($R^2 = 0,18$). Это указывает на то, что в лесных геосистемах многолетние изменения спектрально-отражательных свойств связаны в значительной степени с другими факторами (например, с возрастом древостоя, от которого зависит запас фитомассы). Так, например, установлено влияние на NDVI возраста и породного состава насаждений [13, 14].

В сельскохозяйственных геосистемах значения NDVI и NBR зависят от покрытия растительности, но не зависят от метеофакторов. Только для SWVI в регрессионное уравнение наряду покрытием травянистой и древесной растительности вошло количество осадков. Значение коэффициентов детерминации ниже, чем в случае техногенных геосистем.

В техногенных геосистемах значения всех трех вегетационных индексов значительно зависят от покрытия растительности, но не зависят от рассмотренных метеофакторов. Причем коэффициент детерминации имеет относительно высокие значения ($R^2 = 0,69 - 0,80$).

Таблица 2

Результаты анализа методом множественной регрессии

Геосистемы	Уравнение регрессии	R^2	F
Лесные геосистемы	$NDVI = -0,13 * T + 0,18 * ППТР + 0,59 * ППДР + 0,22$	0,18	11,4
	$NBR = 0,23 * T - 0,28 * ППТР + 0,44 * ППДР - 0,07$	0,56	63,6
	$SWVI = 0,18 * T + 0,16 * O - 0,31 * ППТР + 0,40 * ППДР - 0,31$	0,54	60,4
Сельскохозяйственные геосистемы	$NDVI = 0,63 * ППТР + 0,28 * ППДР + 0,42$	0,60	27,4
	$NBR = 0,72 * ППТР + 0,23 * ППДР - 0,35$	0,71	45,8
	$SWVI = 0,17 * O + 0,68 * ППТР + 0,16 * ППДР + 0,31$	0,61	29,1
Техногенные геосистемы	$NDVI = 0,74 * ППТР + 0,25 * ППДР + 0,23$	0,77	82,6
	$NBR = 0,77 * ППТР + 0,24 * ППДР - 0,25$	0,80	96,5
	$SWVI = 0,64 * ППТР + 0,28 * ППДР - 0,14$	0,69	53,6

Примечание. T — среднемесячная температура ($^{\circ}C$); O — месячное количество осадков (мм); ППТР — проективное покрытие травянистой растительности (%); ППДР — проективное покрытие древесной растительности (%); R^2 — коэффициент детерминации; F — критерий Фишера.

Корреляционный анализ (рассчитывался коэффициент ранговой корреляции Спирмена) показал, что в техногенных геосистемах между значениями вегетационных индексов и проективным покрытием травянистой и древесной растительности существует достоверная положительная связь (значения коэффициентов Спирмена составили 0,8–0,85 и 0,5–0,55 соответственно). В сельскохозяйственных геосистемах аналогично — чем больше проективное покрытие травянистой и древесной растительности, тем выше значения

вегетационных индексов. В случае лесных геосистем вегетационные индексы имели положительную корреляцию с проективным покрытием древесной растительности (коэффициент Спирмена — от 0,42 до 0,74) и отрицательную с проективным покрытием травянистой растительности (от -0,41 до -0,73). Кроме того, в лесных геосистемах обнаружена достоверная корреляция SWVI с температурой (0,16) и осадками (0,21). В целом данные корреляционного анализа не противоречат результатам множественной регрессии.

Выводы

Таким образом в ходе исследований установлено:

1. Многолетняя динамика вегетационных индексов отражает изменения растительного покрова в лесных, сельскохозяйственных и техногенных геосистемах;

2. Антропогенное воздействие на лесные геосистемы выражается:

а) в снижение значений вегетационных индексов NDVI, NBR, SWVI в зависимости от характера нарушений — в 1,5–2 и более раза;

б) в увеличение величин стандартного отклонения NDVI в 2–2,7 раза в сосновых лесах и в 4–6 раз в широколиственных лесах; стандартного отклонения NBR в 2,7–5,3 раза для сосновых лесов и в 2,5–3 раза для широколиственных лесов; стандартного отклонения SWVI в 2,4–3,6 раза для сосновых лесов и в 2,5 раза для широколиственных лесов;

3. Как природных, так и в антропогенных (сельскохозяйственных и техногенных) геосистемах значения вегетационных индексов зависят от проективного покрытия древесной и травянистой растительности; в лесных геосистемах на динамику вегетационных индексов оказывают влияние также климатические факторы (средняя температура месяца и месячное количество осадков); наиболее чувствительным к изменениям климатических параметров из рассмотренных индексов является SWVI.

Литература

1. 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.
2. Гусев А. П. Дистанционные индикаторы ландшафтно-экологических тенденций (на примере юго-востока Беларуси) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Том 5. (71). № 3. С. 127–135.
3. Гусев А. П. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология 2020. № 1. С. 101–107.
4. Miller J. D., Quayle B. Calibration and Validation of Immediate Post-Fire Satellite-Derived Data to three severity metrics. Fire Ecology. 2015. Vol. 11. No. 2. pp. 12–30.
5. Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.

6. Гусев А. П., Шпилевская Н. С. Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на лесной ландшафт // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Том. 6 (16). Вып. 1. С. 192–198.
7. Гусев А. П., Шпилевская Н. С. Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на луговые экосистемы // Экосистемы. 2020. Т. 22. С. 53–59.
8. Воронина П. В., Мамаш Е. А. Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 3. С. 76–102.
9. 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. pp. 71–89.
10. Gitelson A., Merzlyak M. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. Advances in Space Research. 1998. Vol. 22. pp. 689–692.
11. Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemond S., Gregoire J. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 77. P. 22–33.
12. Курганович К. А., Голятина М. А. Пространственно-временной отклик NDVI на изменения климатических характеристик в Забайкальском крае за период 2000–2014 гг. // Вестник ЗабГУ. 2015 № 9 (124). С.10–20.
13. Терехин Э. А. Исследование связи спектральными отражательными свойствами лесных насаждений Белгородской области и их лесотаксационными параметрами // Научные ведомости БелГУ. Серия естественные науки. 2010. № 21 (92). Вып. 13. С. 157–167.
14. Жирин В. М., Князева С. В., Эйдлина С. П. Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat // Лесоведение. 2014. № 5. С. 3–12.

A. P. Gusev

Long-term changes in vegetation indices as an indicator of the dynamics of the state of natural and anthropogenic geosystems

Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus
e-mail: andi_gusev@mail.ru

Abstract. *The aim of this work is to analyze long-term changes in vegetation indices as indicator of anthropogenic dynamics of the state of geosystems. In this work, we used Landsat satellite images from 1984 to 2020. Image processing and calculation of vegetation indices (NDVI, NBR, SWVI) were performed in the QGIS program. The long-term dynamics of vegetation indices in forest, agricultural and technogenic geosystems has been studied. Statistical analysis showed that in natural and anthropogenic (agricultural and technogenic) geosystems, the values of vegetation indices depend on the projective cover of woody and herbaceous vegetation; in forest geosystems, climatic factors also influence the dynamics of vegetation indices; the most sensitive to changes in climatic parameters from the considered indices is SWVI.*

Keywords: *remote sensing, indicator, vegetation index, plant cover, geosystem.*

References

1. 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.
2. Gusev A. P. Distantionnyye indikatory landshaftno-ekologicheskikh tendentsiy (na primere yugo-vostoka Belarusi). Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2019. Vol. 5. (71). No. 3. pp. 127–135. (in Russian)
3. Gusev A. P. Izmeneniya NDVI kak indikator dinamiki ekologicheskogo sostoyaniya landshaftov (na primere vostochnoy chasti Polessoy provintsii). Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2020. No. 1. pp. 101–107. (in Russian)
4. Miller J. D., Quayle B. Calibration and Validation of Immediate Post-Fire Satellite-Derived Data to three severity metrics. Fire Ecology. 2015. Vol. 11. No. 2. pp. 12–30.
5. Stytsenko F. V., Bartalev S. A., Yegorov V. A., Lupyan Y. A. Metod otsenki stepeni povrezhdeniya lesov pozharemi na osnove sputnikovyykh dannykh MODIS. Sovremennyye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2013. Vol. 10. No. 1. pp. 254–266. (in Russian)
6. Gusev A. P., Shpilevskaya N. S. Fitoindikatory tekhnogennogo khimicheskogo vozdeystviya na lesnoy landshaft. Geopolitika i ekogeodinamika regionov. 2020. Vol. 6 (16). Issue 1. pp. 192–198. (in Russian)
7. Gusev A. P., Shpilevskaya N. S. Fitoindikatory tekhnogennogo khimicheskogo vozdeystviya na lugovyye ekosistemy. Ekosistemy. 2020. Vol. 22. pp. 53–59. (in Russian)
8. Voronina P. V., Mamash Ye. A. Klassifikatsiya tematicheskikh zadach monitoringa sel'skogo khozyaystva s ispol'zovaniyem dannykh distantionnogo zondirovaniya MODIS. Vychislitel'nyye tekhnologii. 2014. Vol. 19. No. 3. pp. 76–102. (in Russian)
9. 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. pp. 71–89.
10. Gitelson A., Merzlyak M. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. Advances in Space Research. 1998. Vol. 22. pp. 689–692.
11. Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemond S., Gregoire J. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. Remote Sensing of Environment. 2001. Vol. 77. pp. 22–33.
12. Kurganovich K. A., Golyatina M. A. Prostranstvenno-vremennoy otklik NDVI na izmeneniya klimaticheskikh kharakteristik v Zabaykal'skom kraye za period 2000–2014 gg. Vestnik ZabGU. 2015 No. 9 (124). pp. 10–20. (in Russian)
13. Terekhin E. A. Issledovaniye svyazi spektral'nyimi otrazhatel'nyimi svoystvami lesnykh nasazhdeniy Belgorodskoy oblasti i ikh lesotaksatsionnymi parametrami. Nauchnyye vedomosti BelGU. Seriya yestestvennyye nauki. 2010. No. 21 (92). Issue 13. pp. 157–167. (in Russian)
14. Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Eydlina S. P. Dinamika spektral'noy yarkosti porodno-vozrastnoy struktury grupp tipov lesa na kosmicheskikh snimkakh Landsat. Lesovedeniye. 2014. No. 5. pp. 3–12. (in Russian)

Поступила в редакцию 05.05.2021 г.