

УДК 911.1+577.4+581.5

А. П. Гусев<sup>1</sup>

Н. С. Шпилевская<sup>2</sup>

## **Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на лесной ландшафт**

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины,  
г. Гомель, Республика Беларусь

<sup>1</sup>e-mail: andi\_gusev@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: t\_asha@mail.ru

**Аннотация.** Целью работы является изучение фитоиндикаторов химического загрязнения компонентов ландшафтов. Объект исследований — лесные геосистемы зоны влияния химического производства. Наземными и дистанционными методами выделены техногенные модификации лесных геосистем, соответствующие разным уровням химического воздействия. Химическое воздействие индицируется изменениями показателей растительности (жизненное состояние древесного яруса, состав фитоценоза, численность подроста) и спектрально-отражательных свойств земной поверхности (вегетационных индексов).

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

### **Введение**

Фитоиндикация — это метод, основанный на использовании связи растительности с условиями ее произрастания. В качестве фитоиндикаторов ландшафтной среды выступают как отдельные виды растений, растительные сообщества (фитоценозы), растительный покров в целом. Фитоиндикация широко используется для картографирования и мониторинга загрязнения воздуха, при изучении загрязнения почвенного покрова, поверхностных вод [1, 2, 3]. Фитоиндикаторы могут быть как наземными, так и дистанционными. Физическими предпосылками использования дистанционных методов зондирования Земли (ДЗЗ) являются изменения отражательной способности растительности в разных диапазонах длин электромагнитных волн в зависимости от ее деградации [4]. Так, изменения отражательной способности лесных экосистем проявляются при пожелтении листвы и хвои, дефолиации, при усыхании и уменьшении сомкнутости древесных ярусов [4, 5].

Для целей оценки состояния растительного покрова используют вегетационные индексы — показатели, которые рассчитываются в результате математических операций с разными спектральными каналами в каждом пикселе снимка. Наиболее широко известный индекс — NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который служит количественным показателем фотосинтетически активной биомассы [5, 6]. GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) индицирует содержание хлорофилла в листьях и хвое, а также скорость фотосинтеза [7]. NBR (Normalized Burn Ratio) и SWVI (Short Wave Vegetation Index) чувствительны к содержанию влаги в растениях и отражают стрессовое состояние растительности [8, 9].

Целью работы является изучение наземных и дистанционных фитоиндикаторов химического загрязнения лесных ландшафтов. Задачи

исследований: геоботаническая съемка на пробных площадках на объектах исследований; подбор, атмосферная коррекция многозональных снимков Sentinel-2; расчет вегетационных индексов; анализ изменения наземных и дистанционных показателей по градиенту химического загрязнения в зоне влияния химического производства на примере лесных геосистем.

### Материал и методы

Район исследований находится на юго-востоке Беларуси. Объектом исследований являлись ландшафты зоны влияния Гомельского химического завода, крупнейшего предприятия по производству минеральных удобрений в Беларуси. Функционирование химического завода сопровождается выбросами в атмосферу и накоплением твердых отходов. Источники выбросов находятся в пределах промплощадки завода. В составе выбросов — сернистый ангидрид, пары серной кислоты, аммиак, соединения фтора [10].

Для дистанционной фитоиндикации использованы результаты космической съемки спутников Sentinel-2, которые ведут съемку в 13 каналах с пространственным разрешением 10–60 м. Данные съемки находятся в свободном доступе на Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). 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.

Таблица 1.

#### Характеристика используемых вегетационных индексов

Вегетационный индекс	Формула для расчета на основе каналов спутника Sentinel-2
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(B08 - B04)/(B08 + B04)$
GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$(B08 - B03)/(B08 + B03)$
NBR (Normalized Burn Ratio)	$(B08 - B12)/(B08 + B12)$
SWVI (Short Wave Vegetation Index)	$(B08 - B11)/(B08 + B11)$

Наземные исследования проводились методом геоботанической съемки на пробных площадках (размер площадок — 200 м<sup>2</sup>). На пробных площадках определялись: жизненное состояние древостоя, сомкнутость, бонитет, состав древесных ярусов, состав и численность подроста и подлеска, состав и проективное покрытие напочвенного покрова, мощность лесной подстилки.

Оценка состояния древостоя на пробных площадках выполнялась с помощью индекса (формула 1):

$$L_n = (100 \cdot n_1 + 70 \cdot n_2 + 40 \cdot n_3 + 5 \cdot n_4) / N \quad (1)$$

где  $n_1$  — количество здоровых деревьев;  $n_2$  — количество ослабленных деревьев;  $n_3$  — количество сильно ослабленных деревьев;  $n_4$  — количество усыхающих деревьев;  $N$  — все деревья (включая сухостой) [11].

Методика фитоиндикации предполагала выделение пространственных рядов растительности, индицирующих техногенные модификации (ТМ) геосистем,

обусловленные разным уровнем химического загрязнения. В качестве эталона для сравнения использовалась растительность одноранговых геосистем, не подверженных загрязнению [2].

Статистический анализ выполнялся с помощью программы STATISTICA 6.0. Для оценки достоверности различий между независимыми выборками показателей использовался непараметрический критерий Манна-Уитни.

### Результаты и их обсуждение

В лесном ландшафте, находящемся под воздействием выбросов химического завода, выделяются две техногенные модификации, которые соответствуют определенным уровням трансформации:

ТМ-2 представляет собой сосновые леса в состоянии умеренных нарушений (расположены на расстоянии 1–2,5 км от источников выбросов);

ТМ-1 представляет собой сосновые леса в состоянии значительных нарушений (расположены на расстоянии 0,8–1 км от источников выбросов).

Выделение модификаций основано на сравнении лесных геосистем, находящихся в зоне влияния Гомельского химического завода с однотипными фоновыми геосистемами соснового леса (сосняки орлякового и кисличного типа). Основные показатели, индицирующие процессы деградации природного лесного ландшафта приведены в табл. 2.

**Таблица 2.**

**Индикаторы трансформации лесных геосистем под воздействием загрязнения атмосферы**

Показатель	Градиент химического воздействия		
	Фоновые геосистемы (n=12)*	ТМ-2 (n=14)	ТМ-1 (n=12)
<b>Геоботанические индикаторы</b>			
Индекс жизненного состояния древостоя Ln, балл	87,9±5,0**	55,9±14,9	31,7±3,8
Сомкнутость древостоя, балл	0,90±0,08	0,76±0,06	0,59±0,11
Численность подроста, шт./га	3225±1558	1207±495	917±752
Доля лесных видов, %	75,0±10,1	33,1±16,9	16,3±11,9
Доля луговых видов, %	3,7±5,8	8,8±8,0	17,1±11,5
Доля синантропных видов, %	1,9±2,9	13,6±7,1	35,7±21,5
Доля чужеродных видов, %	0,4±1,4	4,0±3,8	11,1±8,4
<b>Вегетационные индексы</b>			
NDVI	0,814±0,024	0,761±0,023	0,712±0,044
GNDVI	0,757±0,018	0,725±0,017	0,668±0,028
NBR	0,584±0,034	0,516±0,032	0,471±0,052
SWVI	0,293±0,037	0,234±0,036	0,205±0,040

*Примечание: \* — число пробных площадок с геоботаническими описаниями; \*\* — среднее значение и стандартное отклонение; подчеркнуты значения, достоверно отличающиеся по критерию Манна-Уитни от фоновых геосистем.*

Особенность воздействия атмосферного загрязнения на лесные геосистемы — повреждение древесного яруса (хвойные деревья — наиболее чувствительный к химическому воздействию элемент [1, 2]). Нарушения древесного яруса (в том числе гибель части древостоя и последующее снижение сомкнутости) обуславливают появление «окоп» в лесных фитоценозах, в которые вторгаются светолюбивые луговые и рудеральные виды. В результате по градиенту химического воздействия в лесных фитоценозах уменьшается доля лесных видов (в 2,3 раза в зоне ТМ-2 и в 11,9 раза в зоне ТМ-1 по сравнению с фоновыми лесами) и увеличивается доля луговых видов (в 2,4 раза в зоне ТМ-2 и в 4,6 раза в зоне ТМ-1). По мере разрушения древесного яруса резко увеличивается доля синантропных видов, которые в фоновых лесах почти полностью отсутствуют. Среди синантропных видов расширяется участие чужеродных (адвентивных) видов (*Conyza canadensis* (L.) Cronqist, *Oenothera biennis* L., *Impatiens parviflora* DC.). В зоне ТМ-2 луговые и синантропные виды (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Poa nemoralis* L., *Linaria vulgaris* Mill., *Achillea millefolium* L., *Chelidonium majus* L.) встречаются вместе с лесными (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Melampyrum sylvaticum* L., *Convallaria majalis* L.). В зоне ТМ-1 лесные виды почти не встречаются, а доминируют злаки (преимущественно *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth).

Характерным признаком растительности и ее состояния является спектральная отражательная способность, характеризующаяся большими различиями в отражении излучения разных длин волн. Взаимосвязь между структурой и состоянием растительного покрова и его отражательными свойствами позволяют использовать космические снимки для оценки экологического состояния ландшафта.

В пределах указанных зон были выделены тестовые ареалы для определения по серии космических снимков вегетационных индексов. Общая площадь тестовых ареалов: 0,149 км<sup>2</sup> в зоне ТМ-1, 0,113 км<sup>2</sup> в зоне ТМ-2 и 0,687 км<sup>2</sup> в пределах фоновых сосновых лесов. Границы тестовых ареалов проводились в пределах сомкнутых лесных массивов, на удалении не менее 1–2 пикселей от автомобильных дорог, вырубок и других объектов, которые могут искажать спектрально-отражательные свойства смежных с ними лесов.

В течение вегетационного сезона значения индексов изменяются под влиянием различных факторов, причем существенную роль играют метеорологические условия как в момент съемки, так и в предшествующие дни (выпадение осадков, температурные аномалии и т. д.). Поэтому на разновременных снимках контрастность аномалий, связанных с антропогенным воздействием, также меняется. Например, для NDVI отличия нарушенных лесов ТМ-1 от фоновых значений составляли: в мае — 0,102, в июне — 0,091, в августе — 0,069, в сентябре — 0,060. Аналогично для GNDVI: в мае — 0,089, в июне — 0,066, в августе — 0,055, в сентябре — 0,059. Для NBR: в мае — 0,113, в июне — 0,096, в августе — 0,052, в сентябре — 0,029. Для SWVI: в мае — 0,088, в июне — 0,069, в августе — 0,026, в сентябре — 0,001. Очевидно, что наибольшие различия наблюдаются во второй половине мая. Для NBR и особенно для SWVI в августе и сентябре контрастность существенно падает. Таким образом, для выявления повреждений лесных геосистем токсичными выбросами наилучшими являются снимки, приходящиеся на начало лета (май-июнь).

Поврежденные выбросами сосновые леса характеризуются снижением средних значений всех рассматриваемых вегетационных индексов. В зоне ТМ-1 среднее значение NDVI ниже фонового в 1,14 раза, GNDVI — в 1,13 раза, NBR — в 1,24 раза, SWVI 0151 в 1,43 раза. Причем, отличия от фона по критерию Манна-Уитни достоверны ( $p < 0,05$ ). Кроме того, в зоне ТМ-1 имеет место также увеличение стандартного отклонения (в 1,6-1,8 раза для NDVI, в 1,5–1,7 раза для GNDI, в 1,3–1,6 раза для NBR, в 1,1–1,4 раза для SWVI). В зоне ТМ-2 заметного увеличения стандартного отклонения значений индексов по сравнению с фоновыми лесами не наблюдается.

Изменения NDVI отражают изменения продуктивности лесных фитоценозов, подвергшихся воздействию химического загрязнения. Снижение значений GDVI обусловлено тем, что по мере роста загрязнения в растительном покрове становится больше сухих, усохших, пожелтевших растений, что отражается на «зелености» земной поверхности. Снижение NBR и SWVI указывают на стрессовое состояние растительности. Таким образом, вегетационные индексы индицируют повреждения лесного растительного покрова по градиенту химического загрязнения.

### Выводы

На основе выполненных исследований установлено:

1. Воздействие химического загрязнения атмосферы на лесные геосистемы индицируется снижением индекса жизненного состояния и сомкнутости древостоя, снижением численности подроста, уменьшением доли лесных видов и увеличением доли синантропных видов в фитоценозе;

2. Деградация лесной растительности обуславливает изменения спектрально-отражательных свойств земной поверхности, что выражается в снижении значений вегетационных индексов. Колебания вегетационных индексов обусловлены снижением зеленой фитомассы и изменениями цвета (пожелтение) растительности по градиенту химического воздействия.

Практическое использование вегетационных индексов как индикаторов химического воздействия на природные геосистемы ограничено их зависимостью от метеорологических и климатических колебаний, состояния атмосферы в период космической съемки и другими факторами. Поэтому наибольшую эффективность фитоиндикация будет иметь при сочетании дистанционных и наземных методов.

### Литература

1. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / под ред. Р. Шуберта. М.: Мир, 1988. 350 с.
2. Гусев А. П. Индикаторы деградации лесных ландшафтов Белорусского Полесья в зоне влияния химического производства // География и природные ресурсы. 2005. № 4. С. 145–147.
3. Гусев А. П. Фитоиндикаторы техногенного подтопления в зоне влияния полигона промышленных отходов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2015. № 1. С. 128–131.

4. Комарова А. Ф., Журавлева И. В., Яблоков В. М. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова // Принципы экологии. 2016. № 1. С. 40–74.
5. 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.
6. Box E. O., Holben B. N., Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO<sub>2</sub> flux // Vegetatio. 1989. Vol. 80. P. 71–89.
7. Gitelson A., Merzlyak M. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves // Advances in Space Research. 1998. Vol. 22. P. 689–692.
8. 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.
9. Miller J.D., Quayle B. Calibration and Validation of Immediate Post-Fire Satellite-Derived Data to three severity metrics // Fire Ecology. 2015. Vol. 11. № 2. P. 12–30.
10. Гусев А. П., Шершнева О. В., Павловский А. И., Прилуцкий И. О., Акулевич А.Ф. Особенности формирования ландшафтно-геохимических барьеров в зоне влияния отходов химических производств (Гомельский химический завод) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. № 2. С. 147–152.
11. Пугачевский А. В., Кравчук Л. А., Судник А. В., Моложавский А. А. Методические подходы к оценке и картографированию состояния и устойчивости к антропогенным нагрузкам насаждений городов // Природные ресурсы. 2007. № 3. С. 33–44.

A. P. Gusev<sup>1</sup>  
N. S. Shpilevskaya<sup>2</sup>

### *Phytoindicators of technogenic chemical impact on forest landscapes*

Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus

<sup>1</sup>e-mail: andi\_gusev@mail.ru

<sup>2</sup>e-mail: t\_asha@mail.ru

**Abstract.** *The aim of the work is to study phytoindicators of chemical pollution of landscape components. The object of research is the forest geosystems of the zone of influence of chemical production. Terrestrial and remote sensing methods have identified technogenic modifications of forest geosystems corresponding to different levels of chemical impact. The chemical effect is indicated by changes in vegetation indicators (living state of the tree layer, phytocenosis composition, number of undergrowth of trees) and spectrally reflective properties of the earth's surface (vegetation indices).*

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

*References*

1. Bioindikatsiya zagryazneniy nazemnykh ekosistem / pod red. R. Shuberta. M.: Mir, 1988. 350 s. (in Russian)
2. Gusev A. P. Indikatory degradatsii lesnykh landshaftov Belorusskogo Poles'ya v zone vliyaniya khimicheskogo proizvodstva // Geografiya i prirodnyye resursy. 2005. № 4. S. 145–147. (in Russian)
3. Gusev A. P. Fitoindikatory tekhnogenogo podtopleniya v zone vliyaniya poligona promyshlennykh otkhodov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya. 2015. № 1. S. 128–131. (in Russian)
4. Komarova A. F., Zhuravleva I. V., Yablokov V. M. Otkrytye mul'tispektral'nyye dannyye i osnovnyye metody distantsionnogo zondirovaniya v izuchenii rastitel'nogo pokrova // Printsipy ekologii. 2016. № 1. S. 40–74. (in Russian)
5. 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.
6. Box E. O., Holben B. N., Kalb V. Accuracy of the AVHRR Vegetation Index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO<sub>2</sub> flux // Vegetatio. 1989. Vol. 80. P. 71–89.
7. Gitelson A., Merzlyak M. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves // Advances in Space Research. 1998. Vol. 22. P. 689–692.
8. 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.
9. Miller J. D., Quayle B. Calibration and Validation of Immediate Post-Fire Satellite-Derived Data to three severity metrics // Fire Ecology. 2015. Vol. 11. № 2. P. 12–30.
10. Gusev A. P., Shershnev O. V., Pavlovskiy A. I., Prilutskiy I. O., Akulevich A. F. Osobennosti formirovaniya landshaftno-geokhimicheskikh bar'yerov v zone vliyaniya otkhodov khimicheskikh proizvodstv (Gomel'skiy khimicheskii zavod) // Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. 2013. № 2. S. 147–152. (in Russian)
11. Pugachevskiy A. V., Kravchuk L. A., Sudnik A. V., Molozhavskiy A.A. Metodicheskiye podkhody k otsenke i kartografirovaniyu sostoyaniya i ustoychivosti k antropogennym nagruzkami nasazhdeniy gorodov // Prirodnyye resursy. 2007. № 3. S. 33–44. (in Russian)

*Поступила в редакцию 05.02.2020 г.*