

УДК 504.054:581.52+574.21

## Фитоиндикаторы техногенного химического воздействия на луговые экосистемы

Гусев А. П., Шпилевская Н. С.

Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины  
Гомель, Беларусь  
[andi\\_gusev@mail.ru](mailto:andi_gusev@mail.ru)

По результатам исследований луговых экосистем на территории, прилегающей к химическому производству, было установлено воздействие химического загрязнения поверхностных и грунтовых вод на луговые экосистемы в зоне влияния отвалов фосфогипса. Под воздействием подтопления загрязненными грунтовыми водами снижается общее проективное покрытие растительности в среднем в 2,8 раза по сравнению с фоновыми значениями, уменьшается видовое богатство в 2,9 раза, изменяется доля луговых видов в фитоценозе в 2,2 раза. Отмечено значительное снижение значений вегетационных индексов (NDVI – в 1,4–1,9 раза в зависимости от даты космосъемки, GNDV – в 1,2–1,8 раза, NBR – в 1,3–1,8 раза, SWVI – в 2,4–9,5 раза). Изменения вегетационных индексов обусловлены уменьшением зеленой фитомассы, общего проективного покрытия, изменением цвета (пожелтение) луговой растительности по градиенту химического воздействия. Наземными и дистанционными методами выделены модификации луговых экосистем, соответствующие разным уровням химического воздействия. Химическое воздействие индицируется изменениями показателей растительности (состав фитоценоза, видовое богатство, проективное покрытие) и спектрально-отражательными свойствами земной поверхности (вегетационных индексов).

*Ключевые слова:* фитоиндикаторы, экосистема, фитоценоз, вегетационные индексы, химическое загрязнение.

### ВВЕДЕНИЕ

Фитоиндикация – это метод, использующий взаимосвязь растений с условиями их произрастания. В качестве фитоиндикаторов выступают как отдельные виды растений, растительные сообщества (фитоценозы), а также растительный покров в целом. Индикатором (то есть объектом оценки) являются компоненты окружающей среды (биотоп). Фитоиндикация успешно и давно применяется при картографировании и мониторинге загрязнения атмосферы (Биоиндикация загрязнений..., 1988). Разработаны фитоиндикационные методы оценки свойств почвенного покрова смешанных лесов умеренного пояса – влажности, трофности, азотного богатства, содержания гумуса, кислотности и так далее (Цыганов, 1983). В настоящее время активно развиваются дистанционные фитоиндикаторы, основанные на многозональных космических съемках. Физическими предпосылками использования многозональных космических съемок для индикации являются изменения отражательной способности растительности в различных диапазонах электромагнитного спектра в зависимости от ее состояния (Комарова и др., 2016). Например, изменения отражательной способности лесных экосистем проявляются при пожелтении листвы и хвои, дефолиации, при усыхании древостоя, за счет продуктов горения (Василевич и др., 2014).

Для дистанционной оценки состояния растительности используют вегетационные индексы, под которыми понимают показатели, получаемые в результате математических операций с разными спектральными каналами в каждом пикселе космоснимка. Наиболее часто используемый вегетационный индекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), служащий количественным показателем фотосинтетически активной биомассы (Box et al., 1989; Yengoh, 2014). GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) диагностирует содержание хлорофилла в листьях и хвое, а также скорость фотосинтеза (Gitelson, Merzlyak, 1998). NBR (Normalized Burn Ratio) и SWVI (Short Wave Vegetation Index) являются

индикаторами содержания влаги в растениях и отражают стрессовое состояние растительности (Сессато et al., 2001; Miller, Quayle, 2015).

Цель работы – изучить наземные и дистанционные фитоиндикаторы химического загрязнения луговых экосистем. 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 луговой растительности по градиенту химического загрязнения в зоне влияния полигона твердых отходов химического производства.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований расположен на юго-востоке Беларуси (около 10 км на запад от города Гомеля). Объектом исследований являлись луговые экосистемы зоны влияния полигона твердых отходов Гомельского химического завода – крупнейшего предприятия по производству минеральных удобрений в Беларуси. Функционирование химического завода сопровождается накоплением твердых отходов, которые складываются на полигоне (около 100 га) и представляют собой отвалы фосфогипса (состав: 97 % – гипс, 3 % – фосфаты железа и алюминия, ортофосфорная кислота, фторсиликаты калия и натрия, фториды кальция). Отвалы фосфогипса – это постоянно действующий источник загрязнения почв, поверхностных и грунтовых вод (Гусев и др., 2013; Гусев, 2015).

Для дистанционной фитоиндикации применялись результаты космической многозональной съемки спутников Sentinel-2 – 13 каналов с пространственным разрешением 10–60 м (Frampton et al., 2013). Данные съемки находятся в свободном доступе на Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). В работе использованы снимки, сделанные в летний период (26 мая, 20 июня, 11 августа, 26 августа 2018 года).

Атмосферная коррекция, привязка, оцифровка космоснимков, расчет вегетационных индексов выполнены в QGIS 3.6.

В работе использованы вегетационные индексы, рассчитываемые по формулам приведенным в таблице 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)	$(B08-B11)/(B08+B11)$

Примечание к таблице. Каналы: B03 – зеленый (центральная длина волны – 560 нм, ширина полосы – 35 нм); B04 – красный (соответственно 665 и 30 нм); B08 – ближний инфракрасный (842 и 115 нм); B11 – коротковолновой инфракрасный (1610 и 90 нм); B12 – коротковолновой инфракрасный (2190 и 180 нм).

Наземные исследования проводились методом геоботанической съемки на пробных площадках (размер площадок – 100 м<sup>2</sup>). На пробных площадках определялись состав и проективное покрытие травяного покрова, численность и состав естественного возобновления древесных видов.

Проективное покрытие определяли по 5-балльной шкале: (+) – менее 1 %; 1 – менее 5 %; 2 – 6–15 %; 3 – 16–25 %; 4 – 26–50 %; 5 – более 50 %. Для каждого вида устанавливали класс

постоянства: I – менее 20 %; II – 21–40 %; III – 41–60 %; IV – 61–80 %; V – 81–100 % (Миркин и др., 2002). Названия растений даются по С. К. Черепанову (Черепанов, 1995).

Методика фитоиндикации предполагала выделение пространственных рядов фитоценозов, индицирующих техногенные модификации (ТМ) экосистем, обусловленные разным уровнем химического загрязнения. В качестве эталона для сравнения использовалась растительность одноранговых луговых экосистем, не подверженных загрязнению.

Статистический анализ выполнялся с помощью программы STATISTICA 6.0. Для оценки достоверности различий применялся непараметрический критерий Манна-Уитни.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывают многолетние геохимические исследования (Гусев и др., 2013) на территории полигона отходов поверхностные воды имеют высокий уровень загрязнения: общая минерализация составляет 5–10 г/дм<sup>3</sup>, содержание сульфат-иона – 2–5 г/дм<sup>3</sup>, фосфора фосфатного – 1,5–2 г/дм<sup>3</sup>, фтор-иона – 0,2–0,5 г/дм<sup>3</sup>; иона алюминия – до 100 мг/дм<sup>3</sup>). Эти воды также имеют крайне кислую реакцию (рН=2–2,5). От полигона загрязненный поверхностный и грунтовый сток идет в северо-западном направлении, затопливая и подтапливая близлежащие луговые экосистемы.

В зоне влияния полигона фосфогипса нами были выделены фоновая луговая экосистема (луг разнотравно-злаковый) и две ее техногенные модификации:

ТМ-2 – луг, подтопленный загрязненными водами;

ТМ-1 – зона периодического затопления загрязненными водами.

Фоновая экосистема представляет собой периодически скашиваемый луг на дерново-глебоватых супесчаных почвах. В составе лугового фитоценоза доминируют такие виды, как *Potentilla anserina* L., *Achillea millefolium* L., *Vicia cracca* L., *Agrostis tenuis* Sibth., *Phleum pratense* L., *Festuca pratensis* Huds., *Ranunculus acris* L., *Dactylis glomerata* L. и другие (табл. 2). Значительная часть видов (более 80%) – диагностические виды класса Molinio-Arrhenatheretea R. Tx. 1937 em. R. Tx. 1970 (вторичные послелесные луга умеренной зоны Евразии на достаточно богатых незасоленных почвах) по эколого-флористической классификации Браун-Бланке (Миркин и др., 2008). В общем проективном покрытии доминируют *P. anserina*, *A. tenuis* Sibth., *F. pratensis* Huds., *Trifolium pratense* L., *V. cracca* L.

Под воздействием подтопления загрязненными грунтовыми водами (минерализация 1,5–2 г/дм<sup>3</sup>, содержание сульфат-иона – 0,5–0,9 мг/дм<sup>3</sup>, рН=4,5–5) в зоне ТМ-2 снижается общее проективное покрытие растительности (в 1,8 раза по сравнению с фоновым лугом), видовое разнообразие (в 1,7 раза), снижается доля луговых видов (в 1,4 раза). Причем значения этих показателей отличаются от фона статистически достоверно (табл. 2). Снижается численность подроста древесных видов. Часть подроста (34,3 %) – сухостой. В составе фитоценоза возрастает роль таких видов, как *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth, *Chamerion angustifolium* (L.) Holub, *Lythrum salicaria* L.

В зоне ТМ-1 в весенний период (при условии снежной зимы) имеет место кратковременное затопление загрязненными водами, имеющими минерализацию до 5 мг/дм<sup>3</sup>, а рН – ниже 5,5. В этой зоне растительный покров приобретает мозаичную структуру – растительность распространена пятнами, ее общее проективное покрытие составляет 20–40 % (в среднем в 2,8 раза ниже чем в фоновой экосистеме), значительно падает видовое богатство (в 2,9 раза по сравнению с фоновыми лугами). Видно, что доля луговых видов сокращается до 37,8 % от общего их числа. Резко уменьшается численность подроста древесных видов (в 9,2 раза по сравнению с фоном), причем значительная часть подроста – сухая (табл. 3). Здесь остаются только самые устойчивые к загрязнению виды – *C. angustifolium* (L.) Holub, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Rumex crispus* L., *C. epigeios* (L.) Roth, *Bidens tripartita* L. (табл. 2).

По данным Sentinel-2 предпринята попытка использования вегетационных индексов как индикатора химического загрязнения в зоне влияния отвалов фосфогипса. Характерным

Таблица 2

Изменение видового состава растительности по градиенту химического воздействия  
(указаны только виды, имеющие постоянство II-V баллов)

Вид	Градиент химического воздействия		
	Фоновая луговая экосистема (n=9)*	ТМ-2 (n=9)	ТМ-1 (n=10)
<i>Achillea millefolium</i> L.	III	II	–
<i>Agrostis tenuis</i> Sibth.	V <sup>1-2</sup>	III	–
<i>Amoria repens</i> (L.) C. Presl	IV	–	–
<i>Bidens tripartita</i> L.	–	II	II
<i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub	III	–	–
<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth	II	V <sup>1-2</sup>	IV
<i>Chamerion angustifolium</i> (L.) Holub	–	IV	V <sup>1-2</sup>
<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	III	I	I
<i>Dactylis glomerata</i> L.	IV	I	–
<i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	IV	III	II
<i>Equisetum pratense</i> Ehrh.	II	I	–
<i>Festuca pratensis</i> Huds.	V <sup>1-2</sup>	–	–
<i>Juncus effusus</i> L.	III	II	–
<i>Lysimachia vulgaris</i> L.	I	II	II
<i>Lythrum salicaria</i> L.	II	V <sup>1-2</sup>	IV
<i>Medicago lupulina</i> L.	III	–	–
<i>Phleum pratense</i> L.	IV	I	–
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	–	III	II
<i>Plantago major</i> L.	II	–	–
<i>Poa pratensis</i> L.	IV	II	–
<i>Polygonum aviculare</i> L.	I	II	–
<i>Potentilla anserina</i> L.	V <sup>2-3</sup>	IV	I
<i>Parmica vulgaris</i> Hill or Blackw. ex DC.	II	–	–
<i>Ranunculus acris</i> L.	III	II	–
<i>Ranunculus repens</i> L.	II	–	–
<i>Rumex acetosa</i> L.	II	–	–
<i>Rumex crispus</i> L.	III	III	IV
<i>Salix caprea</i> L.	III	II	I
<i>Sonchus arvensis</i> L.	II	–	–
<i>Taraxacum officinale</i> F.H. Wigg.	IV	–	–
<i>Trifolium pratense</i> L.	V <sup>1-2</sup>	II	–
<i>Typha latifolia</i> L.	–	II	I
<i>Veronica longifolia</i> L.	II	–	–
<i>Vicia cracca</i> L.	V <sup>1-2</sup>	–	–

Примечание к таблице. \* – число пробных площадок с геоботаническими описаниями.

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 состояния экосистем.

Таблица 3

Индикаторы загрязнения луговых экосистем в зоне влияния отвалов фосфогипса химического завода

Показатель	Градиент химического воздействия		
	Фоновая луговая экосистема (n=9)*	ТМ-2 (n=9)	ТМ-1 (n=10)
Геоботанические индикаторы			
Общее проективное покрытие, %	90,0±8,3**	<u>51,1±12,7</u>	<u>32,0±9,2</u>
Видовое богатство, число видов на 100 м <sup>2</sup>	15,7±3,3	<u>9,0±1,4</u>	<u>5,4±1,3</u>
Численность подроста, шт./га	367±500	257±500	40±70
Сухостой в подросте, %	0±0	<u>34,3±25,8</u>	<u>89,3±5,4</u>
Доля луговых видов, %	81,8±12,5	<u>57,0±12,1</u>	<u>37,8±16,3</u>
Вегетационные индексы			
NDVI	0,701±0,06	<u>0,511±0,09</u>	<u>0,366±0,11</u>
GDVI	0,675±0,04	<u>0,542±0,10</u>	<u>0,373±0,12</u>
NBR	0,491±0,05	<u>0,375±0,08</u>	<u>0,260±0,11</u>
SWVI	0,195±0,05	<u>0,08±0,08</u>	<u>0,02±0,12</u>

Примечание к таблице. \* – число пробных площадок с геоботаническими описаниями; \*\* – среднее значение и стандартное отклонение. Подчеркнуты значения, достоверно отличающиеся по критерию Манна-Уитни от фоновых экосистем.

Поток токсичных вод вызывает повреждения луговой растительности, что сказывается на спектрально-отражательных свойствах земной поверхности. В пределах указанных зон были выделены тестовые ареалы для определения по серии космических снимков вегетационных индексов. Площадь тестовых ареалов составляет: 0,06 км<sup>2</sup> в зоне ТМ-1, 0,04 км<sup>2</sup> в зоне ТМ-2 и 0,08 км<sup>2</sup> в пределах фоновых луговых экосистем.

Поскольку значения вегетационных индексов испытывают существенные сезонные колебания, то важно выяснить какой период наблюдений будет оптимален для задач индикации загрязнения. В соответствии с этим нами были изучены временные вариации значений вегетационных индексов в выделенных зонах. Установлено, что для NDVI отличия зоны ТМ-1 от фоновой луговой геосистемы составляли: в мае – 0,405, в июне – 0,326, в августе – 0,247. Аналогично для GNDVI: в мае – 0,363, в июне – 0,288, в августе – 0,303. Для NBR: в мае – 0,337, в июне – 0,198, в августе – 0,124. Для SWVI: в мае – 0,287, в июне – 0,14, в августе – 0,061. Очевидно, что, наибольшие различия наблюдаются на снимке, сделанном в конце мая.

Выделенные зоны достаточно четко отличаются друг от друга по величине вегетационных индексов (табл. 3). Так, в зоне периодического затопления загрязненными водами средние значения NDVI в 1,9 раза ниже, чем в фоновой луговой геосистеме. Соответственно средние значения GDVI ниже в 1,8 раза, NBR – в 1,85 раза, SWVI – в 9,5 раза. Весьма чувствительным к повреждению растительности токсичными веществами оказывается SWVI, значения которого резко снижаются уже в зоне ТМ-2. Отличия в спектрально-отражательных свойствах выделенных зон техногенной трансформации прослеживаются на всей серии снимков, т.е. являются устойчивыми в течение всего летнего сезона.

Изменения NDVI отражают изменения продуктивности луговых 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 лугового растительного покрова по градиенту химического загрязнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных исследований установлено, что воздействие химического загрязнения поверхностных и грунтовых вод на луговые экосистемы в зоне влияния отвалов фосфогипса индицируется:

снижением общего проективного покрытия растительности (в среднем в 2,8 раза по сравнению с фоновыми значениями);

снижением видового богатства фитоценоза (в 2,9 раза);

изменением доли луговых видов в фитоценозе (в 2,2 раза);

изменением спектрально-отражательных свойств земной поверхности, которое выражается в значительном снижении значений вегетационных индексов (NDVI – в 1,4–1,9 раза в зависимости от даты космосъемки, GNDVI – в 1,2–1,8 раза, NBR – в 1,3–1,8 раза, SWVI – в 2,4–9,5 раза).

Изменения вегетационных индексов обусловлены уменьшением зеленой фитомассы, общего проективного покрытия, изменением цвета (пожелтение) луговой растительности по градиенту химического воздействия. Успешное использование вегетационных индексов как индикаторов химического воздействия 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.

## Список литературы

- Биоиндикация загрязнений наземных экосистем / [Ред. Р. Шуберта]. – М.: Мир, 1988. – 350 с.
- Василевич М. И., Елсаков В. В., Щанов В. М. Применение спутниковых методов исследования в мониторинге состояния лесных фитоценозов в зоне выбросов промышленного предприятия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 1. – С. 30–42.
- Гусев А. П. Фитоиндикаторы техногенного подтопления в зоне влияния полигона промышленных отходов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2015. – № 1. – С. 128–131.
- 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, геоэкология. – 2013. – № 2. – С. 147–152.
- 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.
- Миркин Б. М., Наумова Л. Г., Соломещ А. И. Современная наука о растительности. – М.: Логос, 2002. – 264 с.
- Цыганов Д. Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. – М.: Наука, 1983. – 196 с.
- Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). – СПб.: Мир и семья, 1995. – 992 с.
- Vox 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.
- Seccato 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.
- Frampton W. J., Dash J., Watmough G., Milton E. J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation // Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2013. – Vol. 82. – P. 83–92.
- Gitelson A., Merzlyak M. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves // Advances in Space Research. – 1998. – Vol. 22. – P. 689–692.
- 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.
- 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.

**Gusev A. P., Shpilevskaya N. S. Phytoindicators of technogenic chemical impact on meadow ecosystems // Ekosistemy. 2020. Iss. 22. P. 53–59.**

The effect of chemical contamination of surface and groundwater of meadow ecosystems in the zone of influence of phosphogypsum dumps was revealed in accordance with the results of meadow ecosystems studies in the territory adjacent to the chemical enterprises. The total projective cover of vegetation decreases by an average of 2.8 times compared to background values; species abundance decreases by 2.9 times; the proportion of meadow species in the phytocenosis decreases by 2.2 times influenced by flooding with polluted groundwater. A significant decrease in the values of vegetation indices was noted (NDVI – by 1.4–1.9 times depending on the date of the space imagery, GNDV – by 1.2–1.8 times, NBR - by 1.3–1.8 times, SWVI – by 2.4–9.5 times). Changes in vegetation indices are caused by a decrease of green phytomass, total projective coverage, and a change in the color (yellowing) of meadow vegetation according to the gradient of chemical exposure. Modifications of meadow ecosystems corresponding to different levels of chemical exposure were identified by ground and remote methods. Chemical chemical impact is indicated by changes in vegetation indices (phytocenosis composition, species abundance, projective coverage) and spectral reflective properties of the earth's surface (vegetation indices).

*Key words:* phytoindicators, ecosystem, phytocenosis, vegetation indices, chemical pollution.

*Поступила в редакцию 17.02.20*