

А.П. ГУСЕВ

ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА СУКЦЕССИОННЫХ СТАТУСОВ ГЕОСИСТЕМ

*УО «Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины»,
г. Гомель, Республика Беларусь
gusev@gsu.by*

Одним из ведущих методов изучения антропогенной динамики геосистем является фитоиндикация, которая основана на способности растительного покрова отражать происходящие в ландшафтах изменения [1-4]. В качестве методического подхода разработана модель сукцессионной системы растительности, которая упорядочивает мозаику растительных сообществ в ряды восстановительных и дигрессивных

сукцессий. Данные ряды растительных сообществ индицируют соответствующую динамику геосистем. Ранее нами предложено выделять следующие сукцессионные статусы геосистем: А – состояние геосистемы, соответствующее абиогенным и пионерным стадиям сукцессии растительности (A^0 – абиогенная стадия, A^1 – пионерные группировки, сообщества с преобладанием терофитов, A^2 – агрофитоценозы); Б – состояние геосистемы, соответствующее бурьянным стадиям сукцессии; Л – состояние геосистемы, соответствующее луговым стадиям сукцессии; ПЛ – состояние геосистемы, соответствующее стадии раннесукцессионного леса; КЛ – состояние геосистемы, соответствующее стадии поздне-сукцессионного леса; близкое к эквифинальному, соответствующее климаксовой стадии.

Для изучения характерных значений спектральных индексов и их сезонной динамики в геосистемах различных сукцессионных статусов были выбраны 194 ареала (площадью не менее 1 га; сукцессионный статус и особенности землепользования уточнены маршрутным методом в августе 2018 г.). С официального сайта *scihub.copernicus.eu* были отобраны безоблачные снимки *Sentinel-2a* (уровень обработки 2A – геометрическая и радиометрическая коррекция), сделанные в разные сезоны года (апрель, май, июнь, август, октябрь). Атмосферная коррекция выполнена с помощью модуля *Semi-Automatic Classification Plugin* в программе *QGIS*. На основе снимков *Sentinel-2a* создана маска ареалов и рассчитаны вегетационные (спектральные) индексы *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index* – нормализованный вегетационный индекс), *NBR* (*Normalized Burn Ratio* – дифференцированный индекс гарей), *SWVI* (*Short Wave Vegetation Index* – коротковолновой вегетационный индекс). *NDVI* представляет собой количественный показатель фотосинтетически активной биомассы, *SWVI* – показатель содержания влаги и хлорофилла в зелёных фракциях растений [5,6,7].

Маска ареалов разработана с помощью визуального дешифрирования снимков *Sentinel-2a* (комбинация каналов 4-8-3 «псевдоцвета») и анализа материалов сервиса «Google Планета Земля». Для расчётов спектральных индексов использовался калькулятор растров программы *QGIS*. Для каждого ареала были рассчитаны статические показатели – среднее, медианное, минимальное, максимальное значения, стандартное (среднеквадратическое) отклонение.

Были выделены следующие группы ареалов, представляющих геосистемы различного сукцессионного статуса (по направлению восстановительной динамики):

- 1) застройка, эксплуатируемые карьеры и полигоны отходов (сукцессионные статусы – A^0 и A^1) – 26 участков, суммарной площадью 83,17 км²;
- 2) пахотные земли (сукцессионный статус A^2) – 39 участков, 96,15 км²;
- 3) залежи и пустыри, зарастающие 2 – 5 и более лет, с рудеральными фитоценозами (сукцессионный статус Б) – 14 участков, 4,13 км²;
- 4) луга и кустарники – луговые и кустарниковые фитоценозы (сукцессионный статус Л);
- 5) сосновые и мелколиственные леса (сукцессионный статус ПЛ);
- 6) смешанные и широколиственные леса (сукцессионный статус КЛ).

Две группы ареалов отражают дигрессивную динамику:

- 7) нарушенные леса – рекреационные и пирогенные модификации сосновых и смешанных лесов (Д1);
- 8) болота и заболоченные земли – травяные фитоценозы, ивняки, черноольшаники (Д2).

Для геосистем A^0 и A^1 -статуса величины вегетационных индексов в течение всего рассматриваемого сезона невелики: средние значения *NDVI* изменяются от 0,19 до 0,34, *NBR* – от -0,1 до 0,08, *SWVI* – от -0,17 до -0,05. Минимальные значения всех индексов отмечены в апреле, максимальные – в летние месяцы.

Геосистемы А²-статуса (пахотные земли) характеризуются более высокими значениями всех индексов. *NDVI* в мае-августе имеет значения 0,54 – 0,56, *NBR* – 0,21–0,28, *SWVI* – 0,03 – 0,08. В апреле и октябре *SWVI* имеет отрицательные значения.

Для геосистем В-статуса присуще увеличение *NDVI* в мае-августе до 0,40 – 0,53. Значения *NBR* максимальны в июне-августе (0,16 – 0,22). *SWVI* характеризуется отрицательными значениями в течение всего рассматриваемого периода.

Геосистемы М-статуса характеризуются существенным ростом значений вегетационных индексов в летние месяцы (*NDVI* – 0,62 – 0,74, *NBR* – 0,35 – 0,44). *SWVI* в с мая по август имеют положительные значения, в другое время – отрицательные.

Раннесукцессионные леса (преимущественно сосновые) характеризуются относительно высокими значениями *NDVI* в течение всего рассматриваемого периода – от 0,58 (апрель) до 0,78 (август). Более контрастно изменяется *NBR* – в 1,8 раза, *SWVI* – в 3,2 раза. Позднесукцессионные леса (широколиственные и смешанные) имеют наибольшие значения анализируемых индексов среди всего изученных геосистем (максимум различий – в июне). Значения *NDVI* в летний период – 0,84 – 0,86, а весной и осенью – 0,43 – 0,77.

В нарушенных лесах наблюдается снижение значений *NDVI* в 1,1 – 1,2 раза, *NBR* – в 1,1 – 1,3 раза, *SWVI* – в 1,2 – 1,3 раза по сравнению с позднесукцессионными лесами. Наибольшие отличия установлены для июня.

Сезонный максимум *NDVI* наблюдался в августе во всех изученных категориях геосистем. Сезонный максимум *NBR* в геосистемах различных статусов наблюдался в июне (А², ПЛ, КЛ) и августе (А⁰, Б, Л). Сезонный максимум *SWVI* также – в июне (А⁰, А², ПЛ, КЛ) и августе (Л).

На примере августа 2018 г. были проведена статистическая оценка по *U*-критерию Манна-Уитни различий между значениями вегетационных индексов для геосистем, имеющих разный сукцессионный статус. Различия в значениях *NDVI* между большинством объектов достоверны ($p < 0,01$). Недостоверны ($p > 0,05$) различия между геосистемами А²- и Б-статуса, между лесами (ПЛ- и КЛ-статус) и болотами. Имеются достоверные ($p < 0,05$) различия между геосистемами М-статуса с болотами и нарушенными лесами. Аналогичные результаты получены для *NBR* и *SWVI*.

Максимальные значения *NDVI* индицируют лесные геосистемы: раннесукцессионные леса – 0,78 (0,70 – 0,85) и позднесукцессионные леса – 0,84 (0,82 – 0,85). Среднеквадратичное отклонения для лесов, как правило, невелико – до 0,04. Пахотные земли также могут иметь высокие значения *NDVI* – до 0,82, но отличаются значительным среднеквадратичным отклонением – 0,21. Среднее значение для пахотных земель – 0,52 (в зависимости от стадии сельскохозяйственных работ – от 0,16 до 0,82). Для геосистем, в пределах которых преобладают пионерные стадии сукцессии, значения *NDVI*, как правило невелики (среднее – 0,32). Геосистемы разных сукцессионных статусов четко различаются по значениям *NBR*. Для лесных геосистем характерны средние значения 0,54 – 0,57 (среднеквадратическое отклонение 0,01 – 0,04). Для геосистем с преобладанием луговых стадий – 0,42, а для геосистем с преобладанием бурьянистых стадий – 0,22). Низкие значения имеют геосистемы А-статуса. Индекс *SWVI* четко дифференцирует лесной и нелесной растительный покров: лесной покров – более 0,20, луговой – около 0,1; начальные стадии сукцессии (А и В) – около 0.

Для дистанционной диагностики сукцессионного статуса геосистем могут быть рекомендованы следующие признаки:

отрицательное значение *SWVI*, *NDVI* < 0,4, *NBR* < 0,1 в течение всего сезона – геосистемы А⁰-, А¹-статусов;

отрицательные значения *SWVI* в течение всего сезона, максимумы *NDVI* = 0,4–0,5 и *NBR* = 0,1–0,2 в летние месяцы – геосистемы В-статуса;

положительные значения *SWVI* летом, отрицательные весной и осенью; максимумы *NDVI*=0,5-0,6 и *NBR*=0,2-0,3 в летние месяцы – геосистемы *A2*-статуса;

положительные значения *SWVI* летом, отрицательные весной и осенью; максимумы *NDVI*=0,6-0,7 и *NBR*=0,3-0,4 в летние месяцы – геосистемы *M*-статуса;

положительные значения *SWVI* в течение всего сезона с максимумом в летние месяцы (0,2 – 0,3); максимумы *NDVI*=0,7 – 0,8 и *NBR*=0,5 – 0,6 в летние месяцы – геосистемы *PL*-статуса;

отрицательные значения в апреле, положительные значения *SWVI* в течение остального сезона с максимумом в летние месяцы (0,2 – 0,3); максимумы *NDVI*=0,8 – 0,9 и *NBR*=0,6 – 0,7 в летние месяцы – геосистемы *CL*-статуса.

Результаты анализа показали, что использование только *NDVI* недостаточно для уверенной диагностики сукцессионного статуса. Для более точной индикации можно рекомендовать использовать также коротковолновой индекс *SWVI*. Оптимальным временем используемых снимков являются летние месяцы, когда наблюдается наибольшая дифференциация значений вегетационных индексов между фитоценозами, имеющими разный сукцессионный статус (таблица 1).

Таблица 1 – Дистанционные индикаторы сукцессионного статуса геосистем (описательная статистика по ареалам геосистем), снимок *Sentinel-2a* 26.08.2018

Индекс	Показатель	Сукцессионный статус					
		A ⁰ и A ¹ n=39*	A ² n=26	B n=14	M n=23	PL n=26	CL n=11
<i>NDVI</i>	Среднее	0,32	0,52	0,54	0,73	0,78	0,84
	Медиана	0,33	0,59	0,58	0,73	0,79	0,84
	Минимум	0,12	0,16	0,19	0,58	0,70	0,82
	Максимум	0,54	0,82	0,71	0,83	0,85	0,85
	Стандартное отклонение	0,11	0,21	0,16	0,07	0,04	0,009
<i>NBR</i>	Среднее	0,07	0,19	0,22	0,42	0,54	0,57
	Медиана	0,06	0,29	0,23	0,44	0,55	0,57
	Минимум	-0,10	-0,23	-0,10	0,18	0,42	0,56
	Максимум	0,31	0,61	0,45	0,62	0,62	0,60
	Стандартное отклонение	0,10	0,27	0,17	0,11	0,04	0,01
<i>SWVI</i>	Среднее	-0,01	-0,08	-0,01	0,11	0,22	0,23
	Медиана	0,05	-0,07	0,01	0,12	0,24	0,23
	Минимум	-0,29	-0,20	-0,13	-0,09	0,13	0,22
	Максимум	0,31	-0,01	0,09	0,32	0,28	0,25
	Стандартное отклонение	0,19	0,05	0,11	0,10	0,04	0,01

* – число ареалов геосистем, разного сукцессионного статуса

Список литературы

1 Виноградов, Б.В. Основы ландшафтной экологии / Б.В. Виноградов. – М.: ГЕОС, 1998. – 418 с.

2 Гусев, А.П. Сукцессионная система как основа фитоиндикации динамики ландшафтов (на примере Полесской ландшафтной провинции) / А.П. Гусев // Природные ресурсы. – 2008. – №2. – С. 51–62.

3 Гусев, А.П. Динамика растительности как индикатор ландшафтно-экологической ситуации / А.П. Гусев // Природные ресурсы. – 2015. – №2. – С. 117–124.

4 Гусев, А.П. Диагностика ландшафтно-экологических ситуаций на основе фитоиндикации/ А.П. Гусев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология – 2016. – №4. – С. 77–83.

5 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 / G.T. Yengoh, D. Dent, L. Olsson, A.E. Tengberg, C.J. Tucker. – Lund University Centre for Sustainability Studies – LUCSUS, 2014. – 80 p.

6 Howard, S.M. An evaluation of Gap-Filled Landsat SLC-Off imagery for wildland fire burn severity mapping / S.M.Howard, M.L.Lacasse // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2004. – № 70. – P. 877–879.

7 Ceccato, P. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain / P.Ceccato, S. Flasse, S. Tarantola, S. Jacquemond, J. Gregoire // Remote Sensing of Environment. – № 77. – 2001. – P. 22–33.