

УДК 911.2:572

А.П. Гусев,
кандидат геолого-минералогических наук,
декан геолого-географического факультета ГГУ им. Ф. Скорины

АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЛАНДШАФТНОЙ СТРУКТУРЫ И ЛЕСНЫЕ СУКЦЕССИИ

Введение. Изучение взаимосвязи между ландшафтной структурой и экологическими процессами – одно из приоритетных направлений ландшафтной экологии [1]. Выполнено значительное число исследований, посвященных изучению влияния ландшафтной структуры на популяционные процессы (миграции, демографическую динамику, кормодобывающие стратегии и т. д.). В меньшей степени изучено влияние ландшафтной структуры на экосистемные процессы [2], в том числе на сукцессии (то есть смены экосистем). При автогенной сукцессии смены экосистем в ландшафте направлены на формирование климакса – мозаики эквифинальных экосистем с максимально замкнутым биологическим круговоротом. Механизм самоподдержания климаксовой мозаики – микросукцессии, обусловленные оборотом поколений поздне-сукцессионных ключевых видов (эдификаторов). Нарушение этих процессов связано с аллогенными сукцессиями, часто направленными в сторону омоложения, упрощения и деградации экосистем. На ландшафтном уровне весь комплекс сукцессионных процессов может быть представлен в виде сукцессионной системы [3].

В целом, выяснение связи сукцессионных процессов, играющих ведущую роль в самовосстановлении геосистем, и ландшафтной структуры следует считать одной из важных задач ландшафтной экологии. Наличие такой связи позволяет использовать ландшафтные метрики для оценки и прогноза состояния сукцессионной системы и ее отдельных сукцессионных комплексов.

Методические подходы. Исследования проводились на тестовых участках (площадь каждого 25 км²), расположенных в аллювиальном террасированном (АТ1, АТ2, АТ3), вторичном водно-ледниковом (ВВЛ) и моренно-зандровом (МЗ) ландшафтах, расположенных на юго-востоке Беларуси. Карты современного землепользования изучаемой территории составлялись на основе топографических карт

масштаба 1:100000, космоснимков Landsat (2005–2007 гг.) и Google Earth. Привязка и оцифровка растров выполнялись в Quantum GIS 1.6.0. Для вычисления ландшафтных метрик (на уровне ландшафта и на уровне класса – для ареалов лесных экосистем) использовался программный продукт FRAGSTATS [4]. Растительный покров изучался методом геоботанической съемки на пробных площадках (100–200 м²) в период 2005–2012 гг. Общее число пробных площадок – 167 (АТ1 – 72; АТ2 – 47; АТ3 – 35; ВВЛ – 8; МЗ – 5). Почвенный покров и материнские породы – с помощью шурфов (глубина 1–2 м).

Для оценки антропогенных изменений изучаемых ландшафтов использовались: К_с – коэффициент экологической стабильности [5] и М – индекс хемеробности [6].

В качестве критериев оценки сукцессионных процессов использовались следующие показатели: ВБ – видовое богатство (число видов на 100 м²); ЕВ – численность естественного возобновления древесных видов (шт./га); ТФ – доля терофитов в спектре жизненных форм (% от всех видов); ФФ – доля фанерофитов в спектре жизненных форм (% от всех видов); QF – представленность видов класса Quercio-Fagetea Br.-Bl. et Vlieger in Vlieger 1937 (мезофитные и мезоксерофитные широколиственные листопадные леса) эколого-флористической классификации Браун-Бланке [7] (% от общего числа видов); VP – представленность видов класса Vaccinio-Piceetea Br.-Bl. in Br.-Bl., Siss. et Vlieger 1939 (бореальные хвойные леса) эколого-флористической классификации Браун-Бланке (% от общего числа видов); ЛЕС – представленность лесных видов (виды всех лесных классов растительности, % от общего числа видов); СИН – синантропизация (доля видов синантропных классов Stellarietea, Artemisietea, Agropyretea, Plantaginetea эколого-флористической классификации Браун-Бланке, % от общего числа видов); АД₁ – доля адвентивных видов от общего числа видов флоры (%); АД₂ – доля адвентивных видов в покрытии (%); АД₃ – доля адвентивных ви-

дов деревьев от общего числа древесных видов (%); AD_4 – доля адвентивных видов деревьев от общей численности естественного возобновления (%).

Оценка состояния древостоя (насаждения) на ключевом участке выполнялась путем расчета индекса состояния древостоя L_n [8].

Задачи исследований: количественный анализ структуры ландшафта на основе использования ландшафтных метрик; оценка антропогенной трансформации ландшафтов; сравнительный анализ характеристик лесных стадий сукцессий в разных ландшафтах; выяснения связи между характеристиками лесной растительности и структурой ландшафта, описываемой ландшафтными метриками.

Результаты и их обсуждение. В работе использованы следующие ландшафтные метрики: Largest Patch Index (LPI), Edge Density (ED), Patch Area Distribution (AREA), Landscape Shape Index (LSI), Shape Index Distribution (SHAPE), Perimeter-Area Ratio Distribution (PARA), Contiguity Index Distribution (CONTIG), Contagion Index (CONTAG), Interspersion & Juxtaposition Index (IJI), Splitting Index (SPLIT), Euclidean nearest neighbor distance (ENN), Landscape Division Index (DIVISION), Shannon's Diversity Index (SHDI), Simpson's Diversity Index (SIDI) [4]. Значения ландшафтных метрик зависят от классификации ландшафтного покрова, поэтому, исходя из задач исследований, данная классификация должна иметь экологическое значение, то есть учитывать пригодность или непригодность типов землепользования для сукцессионного процесса или их сукцессионный статус. С этих позиций

выделены классы землепользования, различающиеся по сукцессионному статусу преобладающих растительных сообществ и по условиям протекания сукцессионных процессов: жилая городская застройка, жилая сельская застройка, промышленная застройка, полигоны отходов, транспортные коммуникации, обрабатываемые земли, луга, кустарники, болота, леса.

Тестовые участки представляют ландшафты, имеющие различный уровень антропогенной трансформации, который может оцениваться по индексу хемеробности и коэффициенту экологической стабильности (таблица 1). В качестве эталона наименее нарушенного ландшафта выступает участок АТ2. Наиболее значительный уровень антропогенной трансформации характерен для моренно-зандрового ландшафта (участок М3).

Был выполнен анализ ландшафтных метрик участков (ландшафтный уровень), различающихся уровнем антропогенной трансформации. Антропогенные изменения ландшафтных метрик носят сложный характер. Четкая связь прослеживается лишь для некоторых индексов (таблица 1). Так, по мере роста антропогенной трансформации снижается LPI (показатель доминирования), увеличиваются ED, LSI (эти метрики описывают фрагментацию ландшафта), SHAPE (характеризует сложность форм ареалов типов землепользования).

Неоднозначно ведут себя метрики конфигурации (IJI) и разнообразия (SHDI, SIDI). Минимальные значения метрик разнообразия присущи как наиболее нарушенным (М3), так и наименее нарушенным (АТ2) ландшафтам.

Таблица 1 – Ландшафтные индексы и метрики (уровень ландшафта)

Показатель	Тестовые участки				
	АТ1	АТ2	АТ3	М3	ВВЛ
Ландшафтные индексы и метрики					
Kc	0,59	0,93	0,72	0,16	0,39
Hem	43,4	23,7	31,9	68,3	55,4
LPI	38,4	88,0	17,9	38,6	33,3
ED	58,8	22,8	52,5	46,4	29,2
LSI	8,45	3,87	7,64	6,85	4,67
SHAPE	1,78	1,60	1,82	2,26	2,24
CONTIG	0,64	0,60	0,54	0,60	0,79
IJI	71,6	50,0	61,6	54,8	48,2
SPLIT	6,3	1,3	10,0	4,5	5,3
SHDI	1,46	0,53	0,99	0,82	0,91
SIDI	0,61	0,21	0,40	0,33	0,54

Максимальное разнообразие характерно для ландшафтов среднего уровня нарушенности (АТ1). Закономерное увеличение значений IJI по мере роста антропогенной трансформации прослеживается в аллювиальном террасированном ландшафте: с 50,0 в наименее нарушенном участке (АТ2) до 71,6 в наиболее нарушенном участке (АТ1).

Анализ метрик лесных экосистем (таблица 2) показал, что слаборазрушенный ландшафт (АТ2) характеризуется максимальными значениями LPI (доминирование лесных экосистем по площади), SHAPE (сложность формы ареалов лесов); минимальными – SPLIT и DIVISION (оценивают раздробленность ареалов лесов).

В моренно-зандровом ландшафте (МЗ) лесные экосистемы занимают менее 1 % площади и представляют собой «острова», окруженные сельскохозяйственными угодьями. Соответственно, здесь LPI и SHAPE минимальны, а SPLIT и DIVISION – максимальны

(таблица 2). С увеличением антропогенной трансформации возрастает изоляция лесных пятен (индекс EEN) и уменьшается их средняя площадь (AREA). Слабо связаны со степенью антропогенного преобразования ландшафта LSI, PARA, CONTIG, IJI.

В ходе исследований был выполнен анализ характеристик сукцессионных процессов в лесных экосистемах, изучаемых ландшафтов (таблица 3). В наиболее нарушенном моренно-зандровом ландшафте лесные стадии сукцессии характеризуются сравнительно низким видовым богатством (причем виды широколиственных лесов отсутствуют, а значительную представленность имеют группы рудеральных и луговых видов). В спектре жизненных форм повышена доля терофитов (в 1,8–11,4 раза больше, чем в аллювиальном террасированном ландшафте) и понижена доля фанерофитов (в 1,5–1,8 раза ниже, чем в аллювиальном террасированном ландшафте).

Таблица 2 – Метрики лесных экосистем (уровень класса)

Показатель	Тестовые участки				
	АТ1	АТ2	АТ3	МЗ	ВВЛ
LPI	38,4	88,0	17,9	0,3	19,8
ED	35,7	19,9	40,2	1,8	16,5
LSI	6,17	3,47	6,49	2,79	4,06
SHAPE	1,61	2,14	1,40	1,39	1,87
SPLIT	6,5	1,3	10,3	48270	16,6
DIVISION	0,85	0,23	0,90	1,00	0,94
AREA	53,6	565,0	42,8	4,0	193,0
EEN	46,8	22,6	42,6	233,0	22,0

Таблица 3 – Характеристики лесных экосистем на тестовых участках

Показатель	Тестовые участки				
	АТ1	АТ2	АТ3	МЗ	ВВЛ
ВБ	14,2 ± 0,4	17,0 ± 0,4	15,8 ± 0,4	13,7 ± 1,9	15,4 ± 1
ЛЕС	44,4 ± 2,9	76,1 ± 3	68,7 ± 4,6	8,5 ± 3	38,6 ± 5
СИН	12,2 ± 1,4	1,4 ± 0,8	2,2 ± 0,8	27,1 ± 6	7,6 ± 2
ТФ	7,8 ± 0,7	1,2 ± 0,4	3,1 ± 0,6	13,7 ± 4	5,3 ± 1,5
ФФ	35,1 ± 1,5	43,8 ± 1,3	40,2 ± 1,4	23,7 ± 7	49 ± 2
ОФ	21,9 ± 2,2	45,9 ± 3,6	45,3 ± 4	0	21,2 ± 4
VP	13,2 ± 1,3	15,2 ± 2,2	9,5 ± 1,6	5,9 ± 2	9,6 ± 1
АД1	5,1 ± 0,7	0,3 ± 0,2	0,9 ± 0,3	5,7 ± 3	5,8 ± 1,4
АД2	9,1 ± 1,9	0,0 ± 0,0	0,4 ± 0,2	1,7 ± 1	2,7 ± 1,9
АД3	12,2 ± 2,6	1,1 ± 1,1	1,7 ± 1	20 ± 12	25 ± 6
АД4	14,9 ± 3,3	0,9 ± 0,9	2,1 ± 1,6	11,4 ± 7	30 ± 10
Ln	71,0 ± 2,3	88,4 ± 2,2	73,3 ± 4,6	53,6 ± 5	77,5 ± 4

Таблица 4 – Распространенность ключевых видов на тестовых участках (в % от общего числа пробных площадок)

Показатель	Тестовые участки				
	АТ1	АТ2	АТ3	МЗ	ВВЛ
Позднесукцессионные					
<i>Quercus robur</i> L.	79,2	80,8	94,3	0	87,5
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	5,6	48,9	31,4	0	12,5
<i>Tilia cordata</i> Mill.	12,5	61,7	40,0	0	25,0
<i>Acer platanooides</i> L.	31,9	76,6	80,0	0	75,0
<i>Carpinus betulus</i> L.	22,2	63,8	68,6	0	37,5
Раннесукцессионные					
<i>Pinus sylvestris</i> L.	79,2	40,4	37,1	80,0	100
<i>Betula pendula</i> Roth.	51,4	46,8	42,9	40,0	75,0
<i>Acer negundo</i> L.	22,2	2,1	8,6	20,0	62,5
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	12,5	0	2,9	20,0	25,0

С возрастанием фрагментации лесного покрова (ED, SPLIT, LSI) и изоляции отдельных лесных массивов (EEN) увеличивается адвентизация лесной флоры, причем наиболее чувствительны показатели АД₃ и АД₄. Сильнофрагментированные ландшафты (МЗ, АТ1, ВВЛ) отличаются повышенной долей адвентивных видов, что указывает на их предрасположенность к агрессивным инвазиям. Еще одно следствие сильной фрагментации и изоляции – ухудшение жизненного состояния древостоев (лесные массивы моренно-зандрового ландшафта характеризуются минимальными значениями индекса жизненного состояния Ln).

Влияние фрагментации ландшафта на сукцессионные процессы выражается в ряде аспектов: 1) уменьшение площади экотопов, пригодных для нормального протекания сукцессий; 2) увеличение расстояния между такими экотопами (то есть их изоляция), снижающая вероятность привнесения семян ключевых видов из сохранившихся рефугиумов; 3) агрессивное воздействие ландшафтного окружения (ландшафтной матрицы) на процессы перемещения видов между экотопами (создание барьеров и т. д.) и на сами экотопы (например, различные объекты и процессы в ландшафтном окружении могут являться факторами, нарушающими нормальный ход сукцессионных процессов – инвазии чужеродных видов, источники загрязнения, гидротехнические сооружения, изменяющие гидрологический режим). В значительной степени фрагментация воздействует на состояние популяций позднесукцессионных эдификаторов (таблица 4).

Отметим, что в ландшафтах с высокой степенью фрагментации лесного покрова (МЗ, АТ1) распространность позднесукцессионных видов деревьев резко снижается. Наиболее чувствительными к фрагментации являются *Carpinus betulus* L., *Tilia cordata* Mill., *Fraxinus excelsior* L. Например, в моренно-зандровом ландшафте (МЗ) позднесукцессионные деревья вообще отсутствуют, а лесные экосистемы формируют только раннесукцессионные виды, в том числе адвентивные (*Acer negundo* L., *Robinia pseudoacacia* L.).

Заключение. Таким образом, имеет место взаимосвязь между антропогенными изменениями структуры ландшафта, которые могут быть количественно оценены с помощью ландшафтных метрик, и сукцессиями лесных экосистем. Существенное влияние на ход сукцессионных процессов и состояние лесных экосистем оказывает фрагментация ландшафта. Соответственно, ландшафтные метрики, оценивающие фрагментацию, могут эффективно использоваться для оценки и прогнозирования динамики лесного покрова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wu, J. Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes / J. Wu // Princeton Guide to Ecology. Princeton University Press, 2009. – P. 438–444.
2. Turner, M. Landscape ecology: The Effect of Pattern on process / M. Turner // Annual Review of Ecology and Systematic, 1989. – Vol. 20. – P. 171–197.
3. 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.

4. *McGarigal, K., Cushman, S.A., Neel, M.C., Ene, E.* FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps, project homepage [Electronic resource] / University of Massachusetts. – Amherst, 2002. – Mode of access: <<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>>. – Date of access: 12.09.2012.
5. Агроэкологія / под ред. В.А. Черникова, А.И. Чекереса. – М.: Колос, 2000. – 536 с.
6. *Steinhard, U.* Hemeroby index for landscape monitoring and evaluation / U. Steinhard, F. Herzog, A. Lausch, E. Muller, S. Lehmann // Environmental Induces – System Analysis Approach. – Oxford: EOLSS Publ., 1999. – P. 237–254.
7. *Braun-Blanquet, J.* Pflanzensociologie / J. Braun-Blanquet. – Wien – New York: Springer-Verlag, 1964. – 865 s.
8. *Пугачевский, А.В.* Методические подходы к оценке и картографированию состояния и ус-

тойчивости к антропогенным нагрузкам насаждений городов / А.В. Пугачевский, Л.А. Кравчук, А.В. Судник [и др.] // Природные ресурсы, 2007. – № 3. – С. 33–44.

SUMMARY

Evidence from 5 test areas (the size 25 км²) the interrelation between anthropogenic changes of landscape pattern (which can quantitatively be estimated by landscape metrics) and successions of wood ecosystems is studied. Considerable influence on successional processes and a state of wood ecosystems produces a landscape fragmentation. Landscape metrics, estimating a fragmentation, can effectively be used for an assessment and forecasting of woods dynamics.

Поступила в редакцию 05.11.2012 г.