

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЛАНДШАФТОВ ЮГО-ВОСТОКА БЕЛОРУССИИ И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ (НА ПРИМЕРЕ ИНВАЗИЙ РАСТЕНИЙ)

А. П. Гусев

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Белоруссия

Поступила в редакцию 15 февраля 2013 г.

Аннотация: Изучены изменения ландшафтной структуры и землепользования на юго-востоке Белоруссии на двух временных срезах: 1 – начало XX века; 2 – начало XXI века. Количественно оценена антропогенная нарушенность и фрагментация ландшафтов и их изменения во времени. Изучена взаимосвязь между ландшафтной структурой и инвазиями растений. Установлена корреляция между инвазиями растений с показателями антропогенной нарушенности окружающего ландшафта, а также ландшафтными метриками, характеризующими фрагментацию и разнообразие ландшафтов. Риск инвазий возрастает в антропогенных ландшафтах по мере роста их фрагментации и гетерогенности.

Ключевые слова: ландшафт, землепользование, ландшафтные метрики, растительные инвазии, Белоруссия.

Abstract: The changes of landscape structure and land use in the south-east of Belarus are studied on two time periods: 1 – the beginning of the XX century, 2 – the beginning of XXI century. The anthropogenic transformation and fragmentation of landscapes and their changes over time are estimated. The interaction between landscape structure and plants invasions is studied. What is more, the correlation between plants invasions and indicators of anthropogenic transformation of the surrounding landscape, as well as the landscape metrics which characterize fragmentation and diversity of landscapes is established. The risk of invasions increases in anthropogenic landscapes within the process of increase in their fragmentation and heterogeneity.

Key words: landscape, land use, landscape metrics, plant invasions, Belarus.

Ландшафтная структура имеет важное экологическое значение, которое определяется ее связью с устойчивостью ландшафтов, влиянием на многие важные экологические процессы. Композиция и конфигурация ландшафта играют главную роль в поддержании биоразнообразия и экосистемных услуг и, следовательно, в благосостоянии человеческого общества [7, 9].

Анализ экологических последствий развития землепользования требует наблюдений в течение длительного периода времени. Слабозаметные изменения в структуре землепользования могут вызвать существенный совокупный эффект на состоянии окружающей среды. Такие изменения могут быть выявлены при количественном анализе ландшафтной структуры на различных временных срезах, охватывающих десятки лет. Изучение экологических последствий изменений землеполь-

зования основывается на системе индикаторов и индексов, описывающих пространственно-временную трансформацию ландшафтной структуры, и широком использовании дистанционных методов и ГИС-технологий [8].

Для количественной оценки ландшафтной структуры используются ландшафтные метрики. Набор используемых метрик зависит от решаемых задач или проблем, от объема анализируемых данных, от специфики изучаемых процессов, их пространственного разрешения. Несмотря на имеющиеся недостатки (зависимость от масштаба, неоднозначность интерпретации и т.д. [5]), ландшафтные метрики считаются наиболее рентабельными индикаторами экологических процессов [6].

Для района исследований (юго-восток Белоруссии) типичны средневысотные (абсолютные отметки – 135-150 м) – моренно-зандровые и вторичные водноледниковые ландшафты и низинные

(абсолютные отметки – 115-135 м) – аллювиальные террасированные и пойменные ландшафты. Климат – умеренно-континентальный. Средняя температура января составляет -7°C , июля $+18,5^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков изменяется от 600 до 530 мм. Коэффициент увлажнения составляет 1,1-1,3.

Исследования проводились на 6 тестовых участках (площадь каждого 25 км²), расположенных в аллювиальном террасированном (АТ1, АТ2, АТ3), вторичном водноледниковом (ВВЛ) и моренно-зандровом (М31, М32) ландшафтах. В работе использовались топографические карты масштаба 1:100000 (1923-1931 и 1985-1988 гг.), космоснимки Landsat (2005-2007 гг.) и Google Earth (2006). На основе этих материалов были разработаны карты земель (land cover/land use) на двух временных срезах: начало XX и начало XXI века. Привязка и оцифровка растров выполнялись в Quantum GIS 1.6.0. Для вычисления ландшафтных метрик использовался программный продукт FRAGSTATS 4.0 [4]. Растительный покров изучался методом геоботанической съемки на пробных площадках (100-200 м²) в период 2005-2012 гг. Общее число пробных площадок – 297 (АТ1 – 109; АТ-2 – 54; АТ3 – 57; ВВЛ – 13; М31 – 28; М32 – 36).

Коэффициент экологической стабильности (K_c) определялся по формуле $K_c = \sum s_i * k_i * g$, где s_i – удельная площадь вида землепользования; k_i – экологическая значимость этого вида землепользования; g – коэффициент геолого-геоморфологической устойчивости рельефа. Стабильность ландшафта оценивалась по следующей шкале: K_c менее 0,33 – очень низкая; $K_c = 0,34-50$ – низкая; $K_c = 0,51-0,66$ – средняя; $K_c = 0,67-1$ – высокая [1].

Индекс хемеробности оценивает степень антропогенной трансформации ландшафта и рассчитывался по формуле: $M = 100 * \sum (S_{ih}/m) * h$, где S_{ih} – удельная площадь ареала со степенью хемеробности h ; m – число степеней хемеробности; h – степень хемеробности [4].

В качестве критериев оценки адвентизации растительного покрова предложены показатели: AD_1 – доля адвентивных видов от общего числа видов флоры (% от числа всех видов); характеризует степень адвентизации флоры; AD_2 – доля адвентивных видов в покрытии (% от общего проективного покрытия); характеризует эколого-ценотическое значение адвентивных видов в растительном покрове; AD_3 – доля адвентивных видов деревьев от общего числа древесных видов; AD_4 – доля адвентивных видов деревьев от общей численно-

сти естественного возобновления; характеризует эколого-ценотическое значение адвентивных деревьев, их способность к самовоспроизводству; AD_5 – встречаемость инвазионных видов, % от числа пробных площадок; характеризует частоту встречаемости адвентивных видов в растительном покрове.

Статическая обработка (методы непараметрической статистики, метод множественной регрессии) выполнялась с помощью программного пакета STATISTICA 6.0.

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), Effective Mesh Size (MESH), Euclidean nearest neighbor distance (ENN), Landscape Division Index (DIVISION), Shannon's Diversity Index (SHDI), Simpson's Diversity Index (SIDI). Подробное описание данных метрик приводится в [2, 3].

Изучение изменения ландшафтной структуры и землепользования на юго-востоке Белоруссии было выполнено нами на двух временных срезах (1 – начало XX века; 2 – начало XXI века). В течение рассматриваемого периода времени антропогенная трансформация ландшафтов была обусловлена изменениями структуры землепользования. В аллювиальном террасированном ландшафте имело место снижение лесистости и увеличение площади застроенных земель. В наибольшей степени эти процессы затронули тестовые участки АТ1, АТ3, в наименьшей – АТ2 (таблица 1). В моренно-зандровом ландшафте сократилась удельная площадь пахотных земель за счет увеличения площади застройки. В наибольшей степени это проявилось на тестовом участке М31, где доля застроенных земель возросла в 5 раз). Для вторичного водноледникового ландшафта характерно увеличение доли лесных земель (в 2,7 раза) за счет послевоенного лесовосстановления на бывших сельскохозяйственных угодьях, а также увеличение доли застроенных земель (в 6,9 раза).

Динамика структуры землепользования обусловила соответствующие изменения в значениях ландшафтных индексов и метрик. Снизилась экологическая стабильность и увеличилась хемеробность на участках АТ1, АТ3, М31. Небольшое уве-

личение экологической стабильности и снижение хемеробности имеет место во вторичном водно-ледниковом ландшафте (ВВЛ). Слабо изменились эти показатели на участках АТ2 и М32 (таблица 1).

Более чувствительно реагируют на изменения землепользования ландшафтные метрики. Так, например, на всех участках увеличилась ландшафтная фрагментация: значения ED увеличились в 1,6-2,4 раза; значения LSI – 1,5-2,1 раза; значения AREA уменьшились – 1,4-3,3 раза. Метрики ED и AREA оценивают фрагментацию ландшафта, т.е. процесс дробления континуума ландшафтов или их элементов деятельностью человека (рост фраг-

ментации отражается увеличением ED и уменьшением AREA). LSI – метрика, учитывающая как плотность краев, так и сложность конфигурации пятен в ландшафте (оценивает нерегулярность формы пятен). Почти на всех участках (кроме М31) увеличилась раздробленность ландшафта на пятна, которая оценивается метрикой SPLIT (SPLIT = 1, когда ландшафт состоит из одного пятна).

Сложный характер имеют изменения индексов SHAPE (оценивает форму пятен, увеличение значений указывает на рост сложности формы) и IJI (оценивает конфигурацию ландшафта, показывает отношение гетерогенности типов землепользо-

Таблица 1

Пространственно-временные изменения землепользования и ландшафтной структуры тестовых участков

Показатель	Тестовые участки					
	АТ1	АТ2	АТ3	М31	М32	ВВЛ
Структура землепользования, %						
Пахотные земли	3,0*	2,5	4,7	36,1	82,3	45,8
	9,3**	1,5	4,3	69,2	75,2	72,8
Застроенные земли	15,4	2,4	9,9	35,4	4,2	9,0
	0,7	0,3	1,0	7,1	1,2	1,3
Леса	60,7	88,2	77,9	4,1	0,9	43,3
	76,6	81,6	86,4	0,5	1,4	16,1
Луга, кустарники, болота	20,9	6,9	7,5	24,4	12,6	1,9
	13,4	16,6	8,3	23,2	22,2	9,8
Ландшафтные индексы и метрики						
K _c	0,59	0,93	0,72	0,01	0,14	0,39
	0,87	0,94	0,91	0,10	0,16	0,33
M	43,4	23,7	31,9	71,3	68,3	55,4
	33,9	23,1	25,6	64,0	66,0	59,1
AREA	20,0	37,0	62,0	26,5	40,5	44,0
	66,7	74,3	193,0	38,0	110,0	60,9
LPI	38,3	39,4	14,8	68,8	36,4	43,8
	68,5	75,3	31,5	28,2	37,5	47,7
ED	54,0	35,0	57,0	61,3	54,3	45,0
	22,9	19,4	34,6	38,8	24,1	28,0
LSI	7,8	5,4	8,2	8,7	7,9	6,6
	3,8	3,4	5,3	5,9	4,0	4,5
SHAPE	1,64	1,79	2,12	1,95	2,32	1,96
	1,96	1,65	2,36	1,97	2,02	1,99
IJI	62,6	59,3	60,6	70,5	50,8	55,4
	82,1	52,1	57,0	75,6	59,1	69,2
SPLIT	5,7	4,4	13,6	6,5	6,8	10,1
	2,1	1,7	5,4	7,1	3,9	3,7
SHDI	1,32	0,61	0,98	1,49	0,87	1,10
	0,83	0,60	0,68	1,11	0,86	0,93
SIDI	0,60	0,25	0,43	0,71	0,37	0,62
	0,38	0,31	0,28	0,51	0,42	0,45

* – начало XXI века; ** – начало XX века.

вания к их максимальной гетерогенности). Ландшафтное разнообразие (SHDI и SIDI) на большинстве участков увеличилось (АТ1, АТ3, М31, ВВЛ).

Изучение взаимосвязи между ландшафтной структурой и экологическими процессами – одно из приоритетных направлений ландшафтной экологии. Одним из важных экологических процессов, влияющим на экологическую ситуацию, является адвентизация растительного покрова, т.е. вторжение в местные растительные сообщества чужеземных видов растений.

Сильно нарушенные ландшафты (М31, М32) имеют высокие показатели адвентизации. Адвентивные виды составляют здесь 19,8-23 % от общего числа видов в нелесных сообществах; 5,7-19,2 % – в лесных сообществах. Наиболее ярко адвентизация проявляется в древесной флоре. Так, даже в лесных сообществах существенная доля подростка представлена адвентивными видами. Участки АТ1 и ВВЛ несмотря на относительно высокую лесистость (соответственно 60,7 и 43,3 %) также характеризуются значительной степенью адвентизации как нелесных, так и лесных сообществ (таблица 2). Обращает на себя внимание, что староосвоенные моренно-зандровый и водно-ледниковый ландшафты, имевшие высокую степень антропогенной трансформации в начале XX века, характеризуются повышенной адвентизацией. Например, на тестовом участке в водноледниковом ландшафте, несмотря на современную высокую лесистость, высокая степень адвентизации может быть связана с значительной нарушенностью на предшествующем этапе.

В ходе исследований была изучена корреляционная связь между показателями адвентизации

растительности (АД₁-АД₅) и характеристиками ландшафта (ландшафтные метрики, описывающие структуру ландшафта и показатели антропогенной трансформации - коэффициент экологической стабильности и индекс хемеробности). Набор рассматриваемых ландшафтных метрик включал: LPI, ED, LSI, AREA, SHAPE, CONTIG, CONTAG, IJI, SPLIT, SHDI, SIDI (всего 11 метрик ландшафтного уровня). Ландшафтные индексы и метрики рассчитывались на участках 2x2 км, для каждого из которых путем геоботанической съемки оценена адвентизация современного растительного покрова и встречаемость наиболее агрессивных инвазивных видов растений (всего 30 участков).

Показатель АД₁ имеет достоверную ($p < 0,05$) корреляцию с ED (коэффициент корреляции Спирмена составил 0,49), LSI (0,40), CONTAG (-0,56), IJI (0,44), SPLIT (0,45), SHDI (0,56), SIDI (0,53). Аналогично АД₂ коррелирует этими же метриками – с ED (0,40), LSI (0,43), CONTAG (-0,53) и т.д. АД₃ достоверно коррелирует только с 3 метриками: с ED (0,39), LSI (0,44), CONTAG (-0,44); АД₄ – с только с 2 метриками: с LSI (0,36) и CONTAG (-0,45). Значения показателя АД₅ положительно коррелируют с ED (0,50), LSI (0,53), IJI (0,45), SPLIT (0,47), SHDI (0,58), SIDI (0,56).

Таким образом, степень адвентизации растительности коррелирует: а) с метриками, характеризующими фрагментацию ландшафта – ED, LSI, CONTAG, MESH и SPLIT (рост фрагментации сопровождается увеличением адвентизации); б) с метриками, характеризующими разнообразие ландшафта – SHDI и SIDI (большему разнообразию соответствует большая степень адвентизации). Степень адвентизации древесной растительности

Таблица 2

Адвентизация современного растительного покрова тестовых участков

Показатель	Тестовые участки					
	АТ1	АТ2	АТ3	М31	М32	ВВЛ
АД ₁	17,5*	9,0	12,9	19,8	23,0	31,0
	5,1**	0,3	0,9	19,2	5,7	5,8
АД ₂	18,2	4,2	24,9	25,5	30,0	47,0
	9,1	0,0	0,4	12,0	1,7	2,7
АД ₃	34,0	16,7	0	72,9	66,7	–
	12,2	1,1	1,7	49,2	20,0	25,0
АД ₄	33,4	18,2	0	84,1	66,7	–
	14,9	0,9	2,1	43,4	11,4	30,0
АД ₅	84,5	57,1	91,7	95,0	96,8	100,0
	55,6	4,2	20,0	87,5	60,0	75,0

* – нелесные сообщества; ** – лесные сообщества

имеет достоверную связь только с метриками фрагментации ED и LSI.

Имеет место тесная связь всех показателей адвентизации с антропогенной нарушенностью окружающего ландшафта. Коэффициент корреляции Спирмена между показателями адвентизации и индексом хемеробности имеет значения 0,80-0,89 ($p < 0,001$); между показателями адвентизации и коэффициентом экологической стабильности – -0,73-0,83 ($p < 0,001$).

Для выяснения влияния различных характеристик ландшафта на адвентизацию растительности был выполнен мультирегрессионный анализ (в качестве независимых переменных рассматривались ED, LSI, IJI, SPLIT, SHDI и коэффициент экологической стабильности – K_c). Получены следующие уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} AD_1 &= -0,96 * K_c + 4,69 \\ AD_2 &= -0,97 * K_c + 9,49 \\ AD_3 &= -3,95 * ED + 4,61 * LSI - 0,51 * K_c \\ AD_4 &= -4,03 * ED + 4,66 * LSI - 0,49 * K_c \\ AD_5 &= -0,91 * K_c + 45,2 \end{aligned}$$

Эти результаты показывают, что основным фактором, определяющим адвентизацию растительного покрова, является нарушенность окружающего ландшафта, а для адвентизации древесной растительности существенное значение имеет также фрагментация ландшафта.

В ходе исследований было изучено распространение наиболее агрессивных видов – *Conyza canadensis* (L.) Cronqist, *Oenothera biennis* L., *Acer negundo* L., *Amaranthus retroflexus* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Galinsoga parviflora* Cav., *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & A. Gray, *Impatiens glandulifera* Royle. Встречаемость всех рассматриваемых инвазионных видов достоверно связана с показателями антропогенной нарушенности окружающего ландшафта – с коэффициентом экологической стабильности (отрицательная связь) и индексом хемеробности (положительная связь). Более сложный характер имеет взаимосвязь встречаемости инвазионных видов и ландшафтных метрик. Так, встречаемость *Conyza canadensis* (L.) Cronqist и *Oenothera biennis* L. достоверно коррелирует с ED (коэффициент корреляции Спирмена составляет 0,44), LSI (0,49), IJI (0,52), SPLIT (0,59), SHDI (0,49). *Amaranthus retroflexus* L. обнаруживает корреляцию с IJI (0,37) и SIDI (0,36). *Galinsoga parviflora* Cav. имеет достоверную корреляцию только с IJI (0,38). Таким образом, при прочих равных условиях риск инвазий этих видов возрастает в

более фрагментированном и более гетерогенном ландшафте.

Рост инвазий при увеличении фрагментации ландшафта – эмпирический факт, который может объясняться следующими механизмами: 1) создание благоприятных условий для миграции инвазионных видов (развитие транспортной инфраструктуры повышает риск заноса их в данный район); 2) создание благоприятных условий для приживания инвазионных видов (фрагментация вызывает изменение микроклимата – рост освещенности, усиление колебаний влажности и температуры воздуха и т.д.); 3) ослабление и деградация ценопопуляций местных ключевых видов (эдификаторов), снижение их конкурентной способности (инвазионные виды получают возможность конкурировать с ними за ресурсы); 4) исчезновение из ландшафта чувствительных к антропогенному воздействию видов, как следствие, увеличение числа свободных экологических ниш.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что в течение рассматриваемого периода времени в результате изменения структуры землепользования произошел рост фрагментации ландшафтов юго-востока Белоруссии. Эти изменения количественно оцениваются с помощью ландшафтных метрик, наибольшую чувствительность среди которых имеют метрики фрагментации (ED, AREA, LSI, SPLIT) и разнообразия (SHDI, SIDI). Изменения ландшафтной структуры тесно связаны с инвазиями адвентивных видов растений. Главным фактором, способствующим инвазиям является антропогенная нарушенность окружающего ландшафта, коррелирующая, в свою очередь, с его фрагментацией. При прочих равных условиях риск инвазий адвентивных видов растений возрастает в антропогенных ландшафтах по мере роста их фрагментации и гетерогенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкология / под ред. В. А. Черникова, А. И. Чересеса. – Москва : Колос, 2000. – 536 с.
2. Cushman S. A. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency / S. A. Cushman, K. McGarigal, M. C. Neel // Ecological Indicators. – 2008. – Vol. 8. – P. 691-703.
3. FRAGSTATS : Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps, project homepage [Electronic resource] / K. McGarigal [et al.] ; University of Massachusetts. – Amherst, 2002. – Mode of access : <<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>>. – Date of access : 12.09.2012.

4. Hemeroby index for landscape monitoring and evaluation / U. Steinhard [et al.] // Environmental Induces – System Analysis Approach. – Oxford : EOLSS Publ., 1999. – P. 237-254.

5. Li H. Use and misuse of landscape indices / H. Li, J. Wu // Landscape Ecology. – 2004. – Vol. 19. – P. 389-399.

6. Syrbe R.-U. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics / R.-U. Syrbe, U. Walz // Ecological Indicators. – 2012. – Vol. 21. – P. 80-88.

7. Turner M. Landscape ecology: The Effect of Pattern on process / M. Turner // Annual Review of Ecology and Systematic. – 1989. – Vol. 20. – P. 171-197.

8. Walz U. Monitoring of landscape change and functions in Saxony (Eastern Germany) : Methods and indicators / U. Walz // Ecological indicators. – 2008. – Vol. 8. – P. 807-817.

9. Wu J. Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes / J. Wu // Princeton Guide to Ecology. – New Jersey : Princeton University Press, 2009. – P. 438-444.

Гусев Андрей Петрович

кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экологии, декан геолого-географического факультета, Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, г. Гомель, Белоруссия, т. (0232) 57-00-33, E-mail: gusev@gsu.by

Gusev Andrey Petrovitch

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, associate professor of the Ecology Chair, Dean of Geology and Geography Department, Gomel' State University named after F. Skoryna, Gomel', Belarus, tel. (0232) 57-00-33, E-mail: gusev@gsu.by