

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

ФРАГМЕНТАЦИЯ ЛАНДШАФТНОГО ПОКРОВА КАК ФАКТОР ДЕГРАДАЦИИ ПОТЕНЦИАЛА САМОВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕОСИСТЕМ

Введение. Сукцессии растительности играют важную роль в процессах самовосстановления геосистем. Самовосстановление растительности обуславливает восстановление почвенного покрова, микроклимата, водного режима, то есть других компонентов геосистемы, что дает возможность оценки потенциала самовосстановления геосистем по признакам растительного покрова [1]. Для природных геосистем представляет угрозу не столько антропогенное уничтожение какой-либо биологической части, сколько разрушение механизма их самовосстановления в ходе восстановительных сукцессий. В значительной степени экологическая ситуация на той или иной территории зависит от соотношения процессов деградации и восстановления геосистем. Напряженность экологической ситуации возрастает при увеличении глубины и пространственного охвата деградационных процессов, снижении способности геосистем выполнять средо- и ресурсовоспроизводящие функции, сохранять экологическое равновесие, поддерживать биопродуктивность и биоразнообразие.

В то же время изучение восстановительных сукцессий на значительных по размеру территориях достаточно сложный и трудоемкий процесс. Вследствие этого выяснение связи между сукцессионными процессами и структурой ландшафтного покрова (ландшафтным паттерном) следует считать одной из важных задач ландшафтной экологии. Наличие такой связи делает возможным использование ландшафтных метрик для оценки и прогноза состояния сукцессионной системы, которое отражает потенциал самовосстановления геосистем.

Ландшафтная фрагментация (то есть процесс дробления континуума ландшафтов или их элементов деятельностью человека) глубоко преобразовала пространственную структуру почти всех ландшафтов и является одной из самых больших угроз функционированию экосистем и биоразнообразию [2]. Предполагается, что фрагментация ландшафтного покрова – один из ведущих факторов деградации потенциала самовосстановления природных геосистем.

Для количественной оценки фрагментации ландшафтного покрова используются ландшафтные метрики, набор которых зависит от решаемых задач или проблем, объема анализируемых данных, от специфики изучаемых процессов, их пространственного разрешения.

Методические подходы. Исследования проводились на 30 тестовых участках (2х2 км), размещенных в ландшафтах юго-востока Беларуси, различающихся по природным условиям (моренно-зандровый, аллювиальный, террасированный, вторичный водноледниковый) и антропогенной преобразованности. Карты современного землепользования изучаемой территории были составлены на основе топографических карт масштаба 1:100000, космоснимков Landsat (2005–2007 гг.) и материалов Google Earth (2006–2007 гг.). Привязка и оцифровка растров выполнялись в Quantum GIS 1.8.0. Для вычисления ландшафтных метрик (на уровне ландшафта и на уровне класса – для ареалов лесных экосистем) использовался программный продукт FRAGSTATS [3]. Растительный покров изучался методом геоботанической съемки на пробных площадках (100–200 м²) в период с 2005 по 2012 г. Общее число пробных площадок – 473 (нелесные стадии – 200; лесные стадии – 273). Характеристика растительности для каждого тестового участка составлена на основе геоботанических описаний на пробных площадках. Отдельно рассчитывались средние значения показателей для нелесных и лесных стадий сукцессии.

В качестве критериев оценки использованы следующие показатели: ВБ – видовое богатство (число видов на 100 м²); ТФ – доля терофитов в спектре жизненных форм (% от всех видов); ФФ – доля фанерофитов в спектре жизненных форм (% от всех видов); QF – представленность видов класса *Quercus-Fagetum* Br.-Bl. et Vlieger in Vlieger 1937 (мезофитные и мезоксерофитные широколиственные листопадные леса) эколого-флористической классификации Браун-Бланке [4] (% 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 видов деревьев от общего числа древесных видов (%); АД4 – доля адвентивных видов деревьев от общей численности естественного возобновления.

Цель исследований – разработка научных основ оценки и прогнозирования сукцессионных процессов по ландшафтному паттерну. **Задачи исследований:** количественный анализ структуры ландшафтного покрова района исследований на основе использования ландшафтных метрик; оценка антропогенной фрагментации ландшафтного покрова; корреляционный анализ показателей сукцессий растительности и фрагментации окружающих геосистем; выяснения связи: фрагментация ландшафтного покрова (количественно оцениваемая ландшафтными метриками) – сукцессии – потенциал самовосстановления.

В работе использованы метрики ландшафтного уровня и уровня класса (лесные экосистемы). Метрики ландшафтного уровня: Largest Patch Index (LPI), Edge Density (ED), Landscape Shape Index (LSI), Patch Area Distribution (AREA), Euclidean nearest neighbor distance (ENN), Interspersion & Juxtaposition Index (IJI), Effective Mesh Size (MESH), Splitting Index (SPLIT), Shannon's Diversity Index (SHDI). На уровне класса рассматривались следующие метрики: PLAND (удельная площадь пятен данного класса), LPI, AREA, ED, LSI, IJI,

SPLIT, ENN, MESH. Подробное описание и ландшафтно-экологическая интерпретация данных метрик приводится в [3; 5].

Результаты и их обсуждение. В ходе исследований был выполнен корреляционный анализ ландшафтных метрик и характеристик растительности. Характеристики нелесных и лесных стадий рассматривались по отдельности. Установлено, что характеристики растительности нелесных стадий не имеют достоверной корреляционной связи с ландшафтными метриками. Это обусловлено тем, что сукцессионный процесс на начальных стадиях в значительной степени зависит от локальных факторов, связанных со свойствами экотопа – влажностью, трофностью и т. д. [6–7].

Изучение корреляции между ландшафтными метриками и показателями растительности лесных стадий показало следующие результаты (таблица 1). Видовое богатство (ВБ) коррелирует с показателями фрагментации как ландшафтного покрова в целом, так и лесных экосистем (MESH, SPLIT). MESH и SPLIT являются метриками, которые оценивают раздробленность ландшафтного покрова (SPLIT=1, а значения MESH максимальны, когда на территории ландшафта представлен только один класс землепользования). При росте фрагментации значения SPLIT увеличиваются, а MESH уменьшаются. Не установлено достоверной связи видового богатства с ландшафтным разнообразием (SHDI – индекс разнообразия Шеннона), конфигурацией (IJI – индекс, оценивающий гетерогенности ландшафтной структуры).

Таблица 1 – Корреляция метрик ландшафтного уровня с показателями растительности лесных стадий (коэффициент корреляции Спирмена; указаны значения при $p < 0,05$)

Показатели растительности	Ландшафтные метрики					
	ED	LSI	IJI	MESH	SPLIT	SHDI
ВБ	Н.д.*	Н.д.	Н.д.	0,51	-0,52	Н.д.
ЛЕС	-0,50	-0,51	-0,51	0,44	-0,43	-0,65
СИН	0,47	0,50	0,42	-0,38	0,41	0,62
ТФ	0,49	0,53	0,45	-0,41	0,41	0,63
ФФ	-0,47	-0,49	Н.д.	Н.д.	Н.д.	-0,56
QF	Н.д.	-0,36	-0,51	0,35	-0,36	-0,52
АД ₁	0,53	0,56	Н.д.	-0,38	0,38	0,45
АД ₂	0,49	0,52	Н.д.	-0,36	0,36	0,39
АД ₃	0,41	0,45	Н.д.	-0,34	0,33	Н.д.
АД ₄	Н.д.	0,38	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.

Примечание: * – недостоверные значения коэффициента корреляции: $p > 0,05$.

Показатели ЛЕС и СИН имеют достоверную корреляцию со многими показателями структуры ландшафтного покрова. Так, при увеличении фрагментации ландшафтного покрова, которая выражается в уменьшении значений MESH, увеличении значений SPLIT, ED (плотность краев или границ в ландшафте), LSI (метрика, учитывающая как пятен плотность краев, так и сложность конфигурации пятен в ландшафте), наблюдается уменьшение доли лесных видов и увеличение синантропных видов в лесных экосистемах. Увеличение изоляции лесных массивов (увеличение ENN) также коррелирует с уменьшением ЛЕС и ростом СИН. Установлена также связь ЛЕС и СИН с показателями ландшафтного разнообразия и конфигурации. Это может объясняться тем, что антропогенное воздействие в пределах тестовых участков вызывает рост разнообразия и сложности конфигурации ландшафтного покрова.

Схожие корреляционные связи характерны для ТФ и ФФ. ТФ имеет достоверную корреляцию с метриками фрагментации, разнообразия и конфигурации ландшафтного покрова. При увеличении фрагментации ландшафтного покрова наблюдается рост доли терофитов в лесных сообществах. Показатель ФФ имеет противоположные тенденции: при росте фрагментации доля фанерофитов в лесных сообществах уменьшается.

Чутким индикатором является QF, имеющий достоверные связи со многими метриками. По мере роста фрагментации ландшафтного покрова доля неморальных видов (характерны для поздне-сукцессионных стадий) в лесных экосистемах сокращается.

С возрастанiem фрагментации лесного покрова (ED, SPLIT, LSI) и изоляции отдельных лесных массивов (ENN) увеличивается адвен-

тизация лесной флоры, причем наиболее чувствительны показатели АД₃ и АД₄. Сильно-фрагментированные ландшафты отличаются повышенной долей адвентивных видов, что указывает на их предрасположенность к агрессивным инвазиям.

Из таблицы 2 видно, что высокую корреляцию с показателями растительности имеют простые метрики, основанные на геометрии лесных массивов: PLAND (удельная площадь лесных экосистем), LPI (отношение площади самого большого лесного массива к общей площади), AREA (средняя площадь лесного массива). Эти метрики, за редким исключением, коррелируют практически со всеми рассматриваемыми показателями. Так, увеличение LPI сопровождается уменьшением СИН (коэффициент корреляции Спирмена составил -0,79), ТФ (-0,76), снижением адвентивизации растительности и, наоборот, ростом ЛЕС (0,84), ФФ (0,55), QF (0,78). На ландшафтном уровне метрики LPI и AREA достоверной связи с показателями растительности не имеют.

Таким образом, из рассмотренного набора ландшафтных метрик достоверную корреляционную связь с показателями растительности имеют метрики, описывающие фрагментацию ландшафта и изоляцию лесных экосистем. Антропогенное воздействие на лесной покров вызывает рост его раздробленности, фрагментации, ведет к изоляции лесных массивов. Это выражается в увеличении разнообразия ландшафтной мозаики (положительная связь с метриками разнообразия), гетерогенности местообитаний и трансформации растительного покрова (рост ТФ и СИН). Эти процессы также способствуют инвазиям адвентивных видов в растительные сообщества, в том числе лесные (увеличение АД₁, АД₂).

Таблица 2 – Корреляция метрик уровня класса (лесные экосистемы) с показателями растительности лесных стадий (коэффициент корреляции Спирмена; указаны значения при $p < 0,05$)

Показатели растительности	Ландшафтные метрики						
	PLAND	LPI	AREA	LSI	SPLIT	MESH	ENN
ВБ	Н.д.*	0,36	0,39	Н.д.	-0,37	0,37	Н.д.
ЛЕС	0,91	0,84	0,78	Н.д.	-0,88	0,87	-0,71
СИН	-0,85	-0,79	-0,78	Н.д.	0,82	-0,80	0,64
ТФ	-0,87	-0,76	-0,82	Н.д.	0,83	-0,82	0,68
ФФ	0,67	0,55	0,67	Н.д.	-0,64	0,61	-0,60
QF	0,85	0,78	0,70	Н.д.	-0,82	0,81	-0,78
АД ₁	-0,70	-0,69	-0,75	0,43	0,72	-0,73	0,37
АД ₂	-0,63	-0,64	-0,71	0,41	0,67	-0,67	Н.д.
АД ₃	-0,44	-0,45	-0,51	0,52	0,47	-0,47	Н.д.
АД ₄	-0,42	-0,39	-0,48	0,44	0,43	-0,44	Н.д.

Примечание: * – недостоверные значения коэффициента корреляции: $p > 0,05$.

Сокращение площади и изоляция лесных массивов негативно влияет на состояние популяций позднесукцессионных эдификаторов (увеличение частоты дигрессий, снижение индекса жизненного состояния), затрудняет их миграцию; в результате имеет место задержка сукцессионных процессов на стадии ранне-сукцессионных лесов, незанятые экологические ниши заполняются адвентивными деревьями (увеличение AD_3 и AD_4).

Для осуществления полной сукцессионной серии необходим некоторый ареал-минимум (определяется минимальной площадью, необходимой для устойчивого существования популяций ключевых видов): на участках, имеющих меньшую площадь, невозможности формирования позднесукцессионных лесных экосистем. Ландшафтная мозаика (например, распределение лесных и нелесных участков) влияет на такой важный фактор сукцессии, как расстояние для источников семян. Георазнообразие может рассматриваться как мера предсказуемости пространственно-временной структуры растительного покрова: большое разнообразие – потенциально большое число экологических ниш, как следствие, высокая неопределенность направления и характера сукцессионных процессов. В то же время на сукцессионные процессы влияют непространственные факторы (пригодность эдафотопов к заселению видами, формирующими сообщества стадий сукцессионной серии; наличие источников семян видов, участвующих в сукцессии; антропогенный пресс – постоянно, периодически или эпизодически действующие факторы, нарушающие ход сукцессии – сенокосение, выпас скота, рекреация, пожары и т. д.). Влияние непространственных факторов придает связи между ландшафтной структурой и сукцессиями стохастичный характер.

Заключение. Таким образом, фрагментация ландшафтного покрова и потенциал самовосстановления геосистем тесно связаны друг с другом. Исследования показали, что рост фрагментации, количественно оцениваемый ландшафтными метриками (ED, LSI, SPLIT, MESH, ENN), сопряжен с увеличением роли синантропных видов, в том числе адвентивных, в лесных сообществах; при этом значение лесных видов (особенно позднесукцессионных) падает. Последствием фрагментации являются два важных диагностических при-

знака деградации потенциала самовосстановления: задержка сукцессий на стадиях ранне-сукцессионного леса и адвентизация растительности. Эти явления имеют крайне негативные экологические последствия: дисбаланс процессов функционирования и непредсказуемый характер дальнейшего развития экосистем; формирование длительно существующих растительных сообществ, обладающих пониженными средозащитными функциями и ингибирующих дальнейший ход восстановительных сукцессий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев, А.П. Потенциал самовосстановления геосистем и его оценка на основе фитоиндикации / А.П. Гусев // Вест. Бел. гос. ун-та. Серия 2. – 2010. – № 1. – С. 77–81.
2. Wu, J. Ecological Dynamics in Fragmented Landscapes / J. Wu // Princeton Guide to Ecology. Princeton University Press, 2009. – P. 438–444.
3. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps, project homepage [Electronic resource] / K. McGariga / University of Massachusetts. – Amherst, 2002. – Mode of access: <<http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>>. – Date of access: 12.09.2012.
4. Braun-Blanquet, J. Pflanzensociologie / J. Braun-Blanquet. – Wien; New York: Springer-Verlag, 1964. – 865 s.
5. Cushman, S.A. Parsimony in landscape metrics: Strength, universality, and consistency / S.A. Cushman, K. McGariga, M.C. Neel // Ecol. Indic. – 2008. – Vol. 8. – P. 691–703.
6. Гусев, А.П. Сукцессионная система как основа фитоиндикации динамики ландшафтов (на примере Полеской ландшафтной провинции) / А.П. Гусев // Природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 51–62.
7. Гусев, А.П. Особенности сукцессий растительности в ландшафтах, нарушенных деятельностью человека (на примере юго-востока Белоруссии) / А.П. Гусев // Сибирский экологический журнал. – 2012. – № 2. – С. 231–236.

SUMMARY

The work provides results of landscape-ecological researches plant successions in fragmented landscapes (on an example of the southeast of Belarus). Correlative analysis of the landscape metrics describing a fragmentation, and vegetation indicators is made. An effect of a fragmentation on communities of nonforest succession stages is not revealed. Connection of a landscape fragmentation to indicators of forest communities is established. Increase of a fragmentation of a landscape cover correlates with increase of a share of synanthropic and invasive species, degradation of late successional species. Fragmentation of a landscape cover causes disturbance of a normal course of successional processes.

Поступила в редакцию 14.11.2013 г.