Пространственно-временной анализ фрагментации лесного покрова Среднего Поволжья с использованием ландшафтных индексов и спутниковых данных Landsat

О. Н. Воробьёв, Э. А. Курбанов, С. А. Лежнин, А. В. Губаев, Д. М. Дергунов, Л. В. Тарасова

Поволжский государственный технологический университет, Центр устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов, Йошкар-Ола, 424000, Россия E-mail: kurbanovea@volgatech.net

Проведён анализ динамики фрагментации лесного покрова Среднего Поволжья по данным 18 разновременных изображений Landsat за 1985, 2001 и 2021 гг. и 11 ландшафтных индексов (метрик). Для этого были проанализированы два временных периода процесса пространственно-временного распределения лесного покрова за 1985-2001 и 2002-2022 гг. с использованием программного обеспечения FRAGSTATS (версия 4.2) и ArcGIS Pro. С целью получения детальных карт на 15 тематических классов изображения Landsat были последовательно классифицированы методом пошаговой неуправляемой и управляемой классификации. Основное внимание было уделено сравнительной оценке ландшафтных индексов, которые описывают фрагментированность структуры лесного покрова, таким как лесистость, плотность лесных участков и их средний размер, индекс формы, интегрированный индекс и связанность лесных участков. Анализ ландшафтных индексов показал, что на территории Среднего Поволжья за 1985-2001 гг. наблюдалась тенденция к увеличению фрагментации лесного покрова. В то же время в 2002-2022 гг. происходит процесс агрегации лесных участков, что свидетельствует о противоположном тренде — снижении фрагментации лесного покрова. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что движущими силами фрагментации лесов Среднего Поволжья остаются сельскохозяйственная деятельность. урбанизация и развитие транспортной инфраструктуры. Предложенные методика и алгоритм представляются полезными инструментами для количественной оценки сложных экосистемных процессов и могут быть использованы в качестве эффективного средства контроля выполнения индикаторов устойчивого управления лесами.

Ключевые слова: фрагментация леса, ландшафтные индексы, Среднее Поволжье, лесные экосистемы, классификация, Landsat, пространственный анализ, FRAGSTATS

Одобрена к печати: 13.01.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-144-159

Введение

Пространственно-временной процесс фрагментации леса может привести к преобразованию больших массивов леса в совокупность более мелких и изолированных участков различных форм и размеров, что обусловливается как естественными процессами (пожары, болезни, буреломы), так и антропогенными (вырубка леса, строительство дорог, расширение площадей сельскохозяйственных угодий, урбанизация ландшафтов) (Hermosilla et al., 2019; Kurbanov et al., 2022; Lai et al., 2022). Фрагментация леса со временем влияет на качество естественной среды обитания животного мира, состав и строение лесных фитоценозов, биоразнообразие экосистемы, снижение площади коренных лесов и в конечном итоге может привести к снижению потенциала леса на выполнение экосистемных функций (Ревуцкая, Фетисов, 2015; Flowers et al., 2020). Таким образом, мониторинг фрагментации лесов как в пространстве, так и во времени имеет решающее значение для понимания и поддержания важных функций экосистемы.

В силу своего сложного характера фрагментированность лесного ландшафта нельзя измерить с помощью только одного показателя (Slattery, Fenner, 2021). Фрагментация леса количественно и качественно описывается с помощью специальных ландшафтных индексов, с помощью которых можно оценить такие показатели, как площадь лесных участков, длина краевой части всех лесных участков, их общая связанность, агрегация, сложность формы участков леса и т.п. (Legarreta-Miranda et al., 2021; Li et al., 2011). Эти индексы могут применяться для трёх пространственных уровней: ландшафта, классов объектов и отдельных участков (Castillo et al., 2015; McGarigal, Marks, 1995). По полученным данным индексы позволяют оценить информацию о лесном ландшафте, характеризуя его состав, общее распределение и площадь (Neel et al., 2004; Remmel, Csillag, 2003).

Для мониторинга и моделирования процесса фрагментации лесов учёными широко используются интегрированные методы ГИС (геоинформационные системы) и данные дистанционного зондирования Земли (Курбанов, Воробьев, 2020; Fynn, Campbell, 2019; Newton et al., 2009) для различных пространственных масштабов. Подобные исследования проведены на национальном уровне в Канаде (Duro et al., 2007; Hermosilla et al., 2019; Wulder et al., 2008), США (Heilman et al., 2002), Китайской Народной Республике (Liu et al., 2019), Мьянме (Leimgruber et al., 2005), Новой Зеландии (Ewers et al., 2006) и Индии (Reddy et al., 2013; Singh et al., 2010).

Много исследований по фрагментации посвящены анализу изменений лесного покрова на уровне ландшафта, чтобы понять пространственные закономерности и взаимодействия между элементами ландшафта с течением времени. Например, на ландшафтном уровне оценка фрагментации лесных насаждений проводилась в Малайзии (Abdullah, Nakagoshi, 2007), Чили (Echeverria et al., 2008), Колумбии (Armenteras et al., 2013), Танзании (Kukkonen, Kayhko, 2014), Сингапуре (Castelletta et al., 2005), Китайской Народной Республике (Xue et al., 2016) и Российской Федерации (Ревуцкая, Фетисов, 2015; Украинский и др., 2017; Baumann et al., 2012). Глобальная оценка свидетельствует о том, что большая часть оставшихся на Земле лесных фрагментов имеет площадь менее 10 га, а негативные последствия фрагментации будут проявляться в течение последующих десятилетий (Haddad et al., 2015).

Таким образом, фрагментация лесных насаждений — это один из главных признаков, подлежащих изучению при оценке ландшафтов в различных масштабах, а также его структуры, функций и динамики. Кроме того, определение степени фрагментированности территории с помощью индексных показателей позволяет оценить уровень устойчивости лесных экосистем к внешним воздействиям. В Российской Федерации исследования фрагментации лесов имеют ограниченный характер, что подтверждается анализом литературных источников. В особенности это касается лесов Поволжья, где в последнее столетие доля антропогенных нарушений выше природных (Воробьев и др., 2016; Кудрявцев, 2021).

Цель работы — провести комплексную оценку динамики фрагментации лесов Среднего Поволжья по архивным данным спутников Landsat. Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- Получены цифровые картографические материалы в ArcGIS Pro на территорию исследования, включающие лесной покров за 1985, 2001 и 2021 гг.
- Подобраны и проанализированы ландшафтные индексы для оценки фрагментации лесного покрова, широко используемые в научных исследованиях.
- Проведена оценка динамики фрагментации лесного покрова Среднего Поволжья за 1985–2001 и 2002–2021 гг.

Объекты исследования

Объектом исследования явился лесной покров территории Среднего Поволжья Российской Федерации, включающий хвойные, смешанные и широколиственные насаждения, расположенный в границах мозаики безоблачных снимков Landsat-8 за 2021 г. (earthexplorer.usgs. gov) (*puc. 1*, см. с. 146). Объекты находятся на территории республик Марий Эл, Татарстан, Чувашия, а также Кировской и Нижегородской областей.



Рис. 1. Регион исследования Среднего Поволжья на мозаике безоблачных изображений Landsat-8 2021 г. (контур зелёного цвета)

Методика исследования

Методика исследования состояла из нескольких этапов (*рис. 2*, см. с. 147): а) подбор спутниковых данных Landsat 1985, 2001 и 2021 гг. на территорию исследования; б) предварительная подготовка изображений (радиометрическая, атмосферная и геометрическая коррекции); в) трансформация изображений в формат BGW (Brightness — *англ.* яркость, Greenness — *англ.* зелёность, Wetness — *англ.* влажность); г) тематическая пошаговая классификация изображений методами неуправляемой и управляемой классификаций; д) получение бинарных растровых карт лесного покрова; е) подбор индексов фрагментации для оценки лесного покрова Среднего Поволжья; ж) обработка тематических карт лесов в модуле FRAGSTAT 4.2; з) пространственный анализ изменений лесного покрова в пакете ArcGIS Pro; и) анализ результатов исследования.

В работе было подобрано 18 спутниковых снимков Landsat-TM (*англ*. Thematic Mapper), Landsat-ETM (*англ*. Enhanced Thematic Mapper) и Landsat-OLI (*англ*. Operational Land Imager) за летние вегетационные периоды 1985, 2001 и 2021 гг. на территорию исследования. Покрытие облаков составляло не более 10 % для каждого спутникового изображения. После проведения радиометрической, атмосферной и геометрической коррекции полученные изображения были преобразованы в компоненты BGW. Подобное преобразование обычно используется с целью выравнивания спектрально-отражательных характеристик на разновременных снимках (Healey et al., 2005; Vorobev et al., 2021). Полученные изображения группировались в виде мозаик для последующей тематической обработки. Для получения детальных карт на 15 тематических классов на основе сформированных растровых мозаик BGW были последовательно проведены пошаговая неуправляемая (ISODATA) и управляемая классификации по методу «максимального правдоподобия» (*англ*. Maximum likelihood). Это позволило выделить два крупных класса наземного покрова исследуемой территории: «покрытые лесом» и «не покрытые лесом».



Рис. 2. Пошаговый алгоритм оценки фрагментации лесного покрова



Рис. З. Карты наземного покрова Среднего Поволжья за разные годы

Далее проведена оценка точности тематического картографирования с использованием индексов общей точности классификации и каппа-статистики на основе обучающей выборки, полученной по результатам полевых исследований, данных лесоустройства и дешифрирования снимков более высокого пространственного разрешения (*рис. 3*, см. с. 147, *табл. 1*).

Год	1985	2001	2021
Общая точность	0,83	0,74	0,76
Каппа-статистика	0,75	0,71	0,74

Таблица 1. Результаты оценки точности картографирования лесного покрова

На последнем этапе были получены тематические бинарные карты с классами «покрытые лесом» и «не покрытые лесом» за 1985, 2001 и 2021 гг. В растровый слой маски «покрытые лесом» (*рис. 4*) вошли все основные лесообразующие породы исследуемого региона (Курбанов и др., 2016). При оценке динамики фрагментации участки леса размером менее 5 га не учитывались. Все картографические цифровые слои и атрибутивные данные обрабатывались в пакете ArcGIS Pro.



Рис. 4. Бинарные тематические карты лесного покрова Среднего Поволжья: *a* — за 1985 г., *б* — 2001 г., *в* — 2021 г.

Описание	Процент лесистости определяется отношением покрытой лесом площади (<i>англ</i> . Forest area, FA) к общей площади исследуемого района (<i>англ</i> . Total area, A)	Число лесных участков в исследовании. Чем их больше, тем леса считаются более фрагментированными	Количество лесных участков на 100 га	Общая длина границ лесных участков с поправкой на долю от об- щей площади лесов	Среднее арифметическое площадей лесных участков: <i>а</i> — площадь лесного участка; <i>n_i</i> — количество лесных участков	LPI равен площади (в м ²) наибольшего участка в ландшафте, от- несённой к общей площади. LPI приближается к 0, когда самый большой участок соответствующего типа становится всё меньше. LPI = 100, когда весь ландшафт состоит из одного участка	SHAPE_MN равняется среднему индексу формы по всем участкам ландшафта (p_{ij} — периметр лесного участка, a_{ij} — площадь лесного участка (в M^2)	ENN_MN равно среднему расстоянию между всеми фрагментами ландшафта <i>h_{ij}</i> на основе кратчайшего расстояния между центрами участков. ENN_MN приближается к 0 по мере уменьшения расстояния до ближайшего соседнего участка	В формуле <i>p_{ij}</i> — периметр лесного участка; <i>a_{ij}</i> — площадь лесного участка (в м ²). Фрактальный индекс приближается к 1 для форм участков с простыми периметрами и близок к 2 для сложных форм
Интервал оценки	0 < PLAND < 100	NP > 1	PD > 0	ED ≽ 0	AREA_MN > 0	0 < LPI < 100	SHAPE_MN > 1	ENN_MN > 0	1 ≤ FRAC ≤ 2
Уравнение	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{A} \times 100$	NP = n	$PD = \frac{n_i}{A} \times 10\ 000 \times 100$	$ED = \frac{\sum_{k=1}^{m} e_{ik}}{A} \times 10\ 000$	$\frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij} \times 10\ 000^{-1}}{n_i}$ AREA_MN = $\frac{n_i}{n_i}$	$LPI = \frac{\max(a_{ij})_{j=1}^{n}}{A} \times 100$	$SHAPE = rac{0,25 p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}}$	$ENN_MN = \frac{\sum_{j=1}^{n} h_{ij}}{n_i}$	$FRAC = \frac{2\ln(0, 25p_{ij})}{\ln a_{ij}}$
й Индекс	I Процент лесистости (<i>англ.</i> Percentage of landscape, PLAND), %	2 Количество групп лесных участков (<i>англ</i> . Number of patches, NP), шт.	 Плотность лесных участ- ков (англ. Patch density, PD), n/100 га 	4 Относительная длина лес- ных участков (<i>англ</i> . Edge density, ED), м/га	5 Средний размер лесного участка (<i>англ</i> . Mean patch size, AREA_MN), м ²	5 Индекс наибольшего участка (<i>англ</i> . Largest patch index, LPI), %	7 Индекс формы (англ. Меап shape index, SHAPE_MN), безразмерный	8 Расстояние до ближайшего соседнего участка (англ. Euclidean nearest neighbor distance, ENN_MN), м	 Фрактальный индекс (англ. Fractal index distribution, FRAC), безразмерный

Таблица 2. Ландшафтные индексы (метрики) для оценки фрагментации лесного покрова

\sim	
табл.	
Окончание	

е Интервал оценки Описание	(a_{jis} PROX > 0 В формуле a_{jis} — площадь лесного участка ijs (в M^2) в пределах за данной территории участка ij , h_{jis} — расстояние (в м) между учас ками ijs и другими участками ijs . PROX увеличивается по мере то ками ijs и другими участки ijs . PROX увеличивается по мере то кам окрестности (определяемые заданным радиусом поиска) всі больше занимают участки одного и того же типа, и по мере того как эти участки становятся ближе и более непрерывными (или менее фрагментированными) в распределении	$ N = 0 \leq PC \leq 100 $ В формуле p_{ij} и a_{ij} — периметр и площадь участка ij с учётом кол чества ячеек поверхности; Z — общее количество ячеек в предел ландшафта. Связанность приближается к 0 по мере того, как до ландшафта, состоящего из фокального класса, уменьшается и с новится всё более подразделённой и менее физически связанно
равнение	$OX = \sum_{s=1}^{n}$	DHESION $\frac{\partial_{ij}^{*}}{\sqrt{a_{ij}^{*}}} \Big] \Big[1$
V	PR	$= \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & $
Индекс У	Интегрированный индекс лесного участка (<i>англ</i> . Proximity index distribution, PROX), безразмерный	Индекс связанности участков (<i>англ.</i> Patch cohe- sion index, COHESION), безразмерный $= \left 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} l}{\sum_{j=1}^{n} p_{ij}^{*}} \right $

Ландшафтные индексы

Для оценки степени фрагментации лесного покрова в работе использовались две пространственные категории: «класс» и «ландшафт» — и 11 ландшафтных индексов (*maбл. 2*) (McGarigal, Marks, 1995). Оценка проводилась с использованием программы FRAGSTATS, версия 4.2 (Maccaчусетский университет, США — *англ*. University of Massachusetts (UMass); https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/3064). Индексы определялись в растровом формате для каждой карты за 1985, 2001 и 2021 гг.

Повышение фрагментированности лесного покрова происходит в том случае, если наблюдаются следующие изменения ландшафтных индексов: увеличение количества лесных участков (NP) (Pyngrope et al., 2021), увеличение плотности участков (PD) и уменьшение их среднего размера (AREA_MN) (Echeverria et al., 2006). Обратный порядок динамики свидетельствует о процессе объединения лесных ландшафтов. Увеличение индекса связанности (*англ.* Cohesion) также свидетельствует о группировке (агрегировании) лесных участков, что приводит к обратному процессу — дефрагментации территории (Fynn, Campbell, 2019). Для лучшего понимания картины динамики фрагментации лесного покрова также проводится оценка индекса относительной длины лесных участков (ED), который непосредственно связан с вышеперечисленными показателями.

Результаты

Количественный анализ полученных результатов по индексам позволил оценить тенденции в фрагментированности лесного покрова Среднего Поволжья (*табл. 3*). Процент лесистости PLAND за первый исследуемый период (1985–2001) уменьшился более чем на 2 %. В течение второй половины (2002–2021) наблюдалось существенное увеличение площади лесов на 11,2 %.

Nº	Индекс	Год		Динамика фрагментации			
		1985	2001	2021	1985—2000 гг.	2001—2021 гг.	в целом, 1985—2021 гг.
1	Процент лесистости (PLAND)	44,2	43,3	48,9	\downarrow	Î	Снижение
2	Количество групп лесных участ- ков (NP)	23 357	23 358	20 160	Î	↓	Снижение
3	Плотность лесных участков (PD)	0,14	0,14	0,12	0	↓	Снижение
4	Относительная длина лесных участков (ED)	20,0	22,2	24,1	Î	Î	Повышение
5	Средний размер лесных участков (AREA_MN)	295,7	289,4	378,9	\Downarrow	Î	Снижение
6	Индекс наибольшего участка (LPI)	25,8	26,5	30,5	ſſ	Î	Снижение
7	Индекс формы (SHAPE)	1,78	1,76	1,80	\Downarrow	Î	Равные изменения
8	Среднее расстояние между центрами лесных участков (ENN_MN)	413,2	408,1	398,6	↓	Ų	Снижение
9	Фрактальный индекс (FRAC)	1,08	1,08	1,08	0	0	Без изменений
10	Интегрированный индекс лес- ного участка (PROX)	66 232	76 674	93 496	Î	Î	Снижение
11	Индекс связанности участков (COHESION)	99,9	99,9	99,9	0	0	Без изменений

Таблица 3. Значения ландшафтных индексов по лесному покрову Среднего Поволжья

Стоит отметить крайнюю неравномерность распределения лесов на территории исследования. Максимум лесов находится в северной и центральной части Нижегородской обл., западной части Республики Марий Эл, центральной и юго-восточной части Кировской обл. Наиболее безлесные площади представлены на территории Чувашии, Республики Татарстан и северо-восточной части Республики Марий Эл.

По результатам исследования выявлено, что с 1985 по 2001 г. количество лесных участков (NP) почти не изменилось, а с 2002 по 2021 г. произошло их существенное уменьшение на 13,6 %: с 23 358 до 20 160 шт. (см. *табл. 3*). Плотность лесных участков (PD) с 2002 по 2021 г. также не претерпела изменений и составила около 0,15 шт. на 100 га. Начиная с 2002 по 2021 г. наблюдается снижение PD до 0,13 единиц.

Средняя площадь лесных участков (AREA MN) также выступает одним из индексов, по которому количественно определяют фрагментированность лесных ландшафтов. За первый период наблюдений (1985-2001) средняя площадь лесных участков уменьшилась на 2,1 % (см. табл. 3), а во вторую половину (2002–2021) наблюдается увеличение этого показателя почти на 30 %: с 289 до 379 га. Это свидетельствует о существенном снижении раздельности участков леса за последние два десятилетия, что можно объяснить зарастанием сельскохозяйственных земель древесно-кустарниковой растительностью (Воробьев и др., 2016). Положительная динамика относительной длины границ лесных участков (ED) свидетельствует об изменении их формы от простой к сложной, но этот тренд нивелируется увеличением средних площадей (AREA_MN) участков и существенно не влияет на фрагментацию.

Пространственные изменения лесных участков

Относительные классы переходов «лес в не лес» и «не лес в лес» и количественные изменения лесных участков за два исследуемых периода приведены на рис. 5 (см. с. 153) и в табл. 4. Карты изменений и динамика по площади исследуемых классов были получены с использованием модуля анализа изменений (англ. Change detection) в комплексном пакете ArcGIS Pro. Анализ динамики изменений площади лесного покрова за первый период (1985–2001) (см. рис. 5а) показал, что положительные изменения наблюдаются в основном на территории южной части Кировской обл., в центральной и северной частях Республики Марий Эл, а также в центральной части Нижегородской обл. Отрицательная динамика представлена практически на всей территории исследования. За оцениваемый период площадь класса «лес в не лес» снизилась на 7,1 %. В то же время площадь класса «не лес в лес» увеличилась на 8,1 %, что свидетельствует о восстановлении лесного покрова до уровня 1985 г. Потери в лесном покрове связаны с вырубкой леса и процессом урбанизации на территории исследования.

<i>Таблица 4</i> . Динамика площади лесных участков с 1985 по 2021 г.

Период исследования, годы	Категория перехода, га/%			
	Не лес в лес	Лес в не лес		
1985-2001	1 104 915/7,1	1 250 467/8,01		
2002-2021	2 032 282/13,1	1 154 401/7,4		

С 2002 по 2021 г. доля класса «не лес в лес» увеличилась на 13,1 %, а его потери составили 7,4 % (см рис. 5б). Максимальный прирост лесов наблюдается на территории Нижегородской и Кировской областей, а также в Республике Марий Эл. Минимум прироста приходится на Республики Чувашия и Татарстан. Потери лесного покрова связаны в первую очередь с крупными лесными пожарами 2010 г. на территории Нижегородской обл. и Республики Марий Эл, а также с изменением политики в области сельского хозяйства, когда крупные участки залежей, ранее заросшие древесными породами-пионерами, снова переводятся под выращивание сельскохозяйственных культур.



Рис. 5. Пространственное распределение динамики лесного покрова Среднего Поволжья за периоды: a - 1985 - 2001 гг.; $\delta - 2002 - 2021$ гг.

Анализ трендов фрагментации

Полученные значения индексных показателей по лесному покрову за первую половину исследуемого периода (1985–2001) свидетельствуют о сохранения тенденции на увеличение фрагментации лесов на территории исследования (см. *табл. 3*).

В течение второго исследуемого периода (2002–2021) наблюдается противоположная тенденция (см. *табл. 3*). В целом происходит увеличение значений ландшафтных индексов PLAND, NP, PD, TE, ED(AREA_MN), SHAPE_MN, ENN_MN, LPI, PROX, а также сохраняется стабильность показателей FRAC, COHESION и PC. Этому могли способствовать следующие причины:

- Последствия снижения лесозаготовок в исследуемом регионе.
- Вторичная сукцессия на территории вырубок и гарей.
- Большие площади бывших сельскохозяйственных земель (земли залежей) ввиду отсутствия их обработки за последние 35 лет были подвержены интенсивному зарастанию, прежде всего лиственными породами, с последующим переходом в возрастную группу молодняков и средневозрастных насаждений (Курбанов и др., 2010).

Даже крупные лесные пожары 2010 г. на территории Республики Марий Эл и Нижегородской обл. не смогли остановить процесс снижения фрагментации лесного покрова. Пожары не привели к существенному разделению лесных массивов на отдельные фрагменты, так как очаги гарей в основном находились внутри крупных по площади лесных массивов. Кроме того, на гарях происходит интенсивное зарастание древесными породами (берёза, осина, сосна), что возвращает данные земли в лесной покров территории.

Заключение

В работе проведена оценка динамики и степени фрагментации лесного покрова на территории Среднего Поволжья за период с 1985 по 2021 г., лесистость территории которой представлена неравномерно. Анализ фрагментации лесного покрова за прошедшие 35 лет позволил проследить процесс пространственного распределения лесов Среднего Поволжья. Лесной ландшафт территории можно охарактеризовать как умеренно фрагментированный с тенденцией к агрегированию (объединению) лесных участков, иначе говоря к снижению фрагментации. Об этом свидетельствует снижение значений индексов фрагментации NP, PD, ENN_MN и увеличение значений PLAND, ED, AREA_MN, LPI, PROX, равные изменения индекса формы SHAPE_MN, а также отсутствие динамики изменений значений фрактального индекса (FRAC) и индекса связанности лесных участков (COHESION). Пространственный анализ лесных участков также показывает тенденцию к увеличению их площади на всей территории исследования. Исследуемые лесные территории с 1985 по 2021 г. не претерпели существенных изменений, несмотря на внешние негативные факторы природного и антропогенного характера (пожары 2010 г., вырубка, болезни леса, ветровалы), и в них продолжаются процессы снижения фрагментации.

Исследование может служить основой для понимания потенциального воздействия фрагментации на биоразнообразие и уязвимость лесных экосистем Среднего Поволжья. В работе использовались спутниковые изображения и ландшафтные индексы на уровне региона. Тем не менее для полного понимания процесса фрагментации требуется детальная оценка на уровне отдельных лесных участков (например, лесничеств), что позволит выявить основные факторы, приводящие к пространственно-временным закономерностям в их распределении.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что движущими силами фрагментации лесов Среднего Поволжья остаются сельскохозяйственная деятельность, урбанизация и развитие транспортной инфраструктуры. Предложенная методика может быть использована для продвижения устойчивого управления лесным хозяйством и принятия научно обоснованных решений при общем планировании лесохозяйственной деятельности на территории Среднего Поволжья.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-16-00094 (https://rscf.ru/project/22-16-00094/).

Литература

- 1. Воробьев О. Н., Курбанов Э. А., Полевщикова Ю. А., Лежнин С. А. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 124–134. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134.
- 2. *Кудрявцев А. Ю*. Трансформация лесных экосистем лесостепной зоны среднего Поволжья // Экосистемы: экология и динамика. 2021. Т. 5. № 2. С. 57–85. DOI: 10.24411/2542-2006-2021-10084.
- 3. *Курбанов Э.А., Воробьёв О. Н.* Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учеб. пособие. Йошкар-Ола: Поволжский гос. технол. ун-т, 2020. 266 с.
- 4. *Курбанов Э.А., Воробьёв О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Незамаев С.А., Александрова Т.А.* Оценка зарастания земель запаса Республики Марий Эл лесной растительностью по спутниковым сним-кам // Вестн. Марийского гос. техн. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2010. № 2. С. 14–20.
- 5. *Курбанов Э.А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А.* Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 36–48. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-36-48.
- 6. *Ревуцкая О.Л., Фетисов Д. М.* Пространственное распределение охотничьих животных Еврейской автономной области в зависимости от лесистости территории // Региональные проблемы. 2015. Т. 18. № 4. С. 52–59.
- 7. Украинский П.А., Терехин Э.А., Павлюк Я.В. Фрагментация лесов верхней части бассейна реки Ворскла с конца XVIII века // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5.: География. 2017. № 1. С. 82–91.
- Abdullah S. A., Nakagoshi N. Forest fragmentation and its correlation to human land use change in the state of Selangor, peninsular Malaysia // Forest Ecology and Management. 2007. V. 241. Iss. 1–3. P. 39–48. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.12.016.
- Armenteras D., Gonzales T. M., Retana J. Forest fragmentation and edge influence on fire occurrence and intensity under different management types in Amazon forests // Biological Conservation. 2013. V. 159. P. 73–79. DOI: 10.1016/j.biocon.2012.10.026.
- Baumann M., Ozdogan M., Kuemmerle T., Wendland K.J., Esipova E., Radeloff V.C. Using the Landsat record to detect forest-cover changes during and after the collapse of the Soviet Union in the temperate zone of European Russia // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 124. P. 174–184. DOI: 10.1016/j. rse.2012.05.001.
- 11. *Castelletta M., Thiollay J., Sodhi N.* The effects of extreme forest fragmentation on the bird community of Singapore Island // Biological Conservation. 2005. V. 121. Iss. 1. P. 135–155. DOI: 10.1016/j. biocon.2004.03.033.
- Castillo E. M., García-Martin A., Aladrén L. A. L., de Luis M. Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo natural park (Spain) // Applied Geography. 2015. V. 62. P. 247–255. DOI: 10.1016/j.apgeog.2015.05.002.
- 13. *Duro D. C., Coops N. C., Wulder M.A., Han T.* Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2007. V. 31. Iss. 3. P. 235–260. DOI: 10.1177/0309133307079054.
- Echeverria C., Coomes D.A., Salas J., Rey-Benayas J. M., Lara A., Newton A. C. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests // Biological Conservation. 2006. V. 130. Iss. 4. P. 481–494. DOI: 10.1016/j.biocon.2006.01.017.
- Echeverria C., Coomes D.A., Hall M., Newton A. C. Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile // Ecological Modelling. 2008. V. 212. Iss. 3–4. P. 439–449. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.10.045.
- Ewers R. M., Kliskey A. D., Walker S., Rutledge D., Harding J. S., Didham R. K. Past and future trajectories of forest loss in New Zealand // Biological Conservation. 2006. V. 133. P. 312–325. DOI: 10.1016/j. biocon.2006.06.018.
- 17. *Flowers B.*, *Huang K. T.*, *Aldana G. O.* Analysis of the habitat fragmentation of ecosystems in Belize using landscape metrics // Sustainability. 2020. V. 12(7). Art. No. 3024. 14 p. DOI: 10.3390/su1207302.
- 18. *Fynn I. E.M.*, *Campbell J.* Forest fragmentation analysis from multiple imaging formats // J. Landscape Ecology. 2019. V. 12. Art. No. 1. 15 p. DOI: 10.2478/jlecol-2019-0001.

- 19. Haddad N. M., Brudvig L. A., Clobert J., Davies K. F., Gonzalez A., Holt R. D., Lovejoy T. E., Sexton J. O., Austin M. P., Collins C. D., Cook W. M. et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems // Science Advances. 2015. V. 1. Iss. 2. Art. No. e1500052. DOI: 10.1126/sciadv.1500052.
- Healey S. P., Healey S. P., Cohen W. B., Zhiqiang Y., Krankina O. N. Comparison of tasseled cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 97. Iss. 3. P. 301–310. https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.009.
- 21. *Heilman G. E., Strittholt J. R., Slosser N. C., Dellasala D. A.* Forest fragmentation of the conterminous United States: assessing forest intactness through road density and spatial characteristics: forest fragmentation can be measured and monitored in a powerful new way by combining remote sensing, geographic information systems, and analytical software // BioScience. 2002. V. 52. P. 411–422.
- 22. *Hermosilla T., Wulder M.A., White J. C., Coops N. C., Pickell P.D., Bolton D. K.* Impact of time on interpretations of forest fragmentation: Three-decades of fragmentation dynamics over Canada // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 222. P. 65–77. DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.027.
- 23. *Kukkonen M., Kayhko N.* Spatio-temporal analysis of forest changes in contrasting land use regimes of Zanzibar, Tanzania // Applied Geography. 2014. V. 55. P. 193–202. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.09.013.
- 24. *Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S., Sha J., Wang J., Li X., Cole J., Dergunov D., Wang Y.* Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: a review // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 19. Art. No. 4714. DOI: 10.3390/rs14194714.
- 25. *Lai S., El-Adawy A., Sha J., Li X., Wang J., Kurbanov E., Lin Q.* Towards an integrated systematic approach for ecological maintenance: Case studies from China and Russia // Ecological Indicators. 2022. V. 140. Art. No. 108982. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108982.
- Legarreta-Miranda C. K., Prieto-Amparán J. A., Villarreal-Guerrero F., Morales-Nieto C. R., Pinedo-Alvarez A. Long-term Land-Use/Land-Cover Change increased the landscape heterogeneity of a fragmented temperate forest in Mexico // Forests. 2021. V. 12. Iss. 8. Art. No. 1099. 14 p. DOI: 110.3390/ f12081099.
- 27. Leimgruber P., Kelly D., Steininger M., Brunner J., Muller T., Songer M. Forest cover change patterns in Myanmar (Burma) 1990–2000 // Environmental Conservation. 2005. V. 32. No. 4. P. 356–364. DOI: 10.1017/S0376892905002493.
- 28. *Li M., Zhu Z., Vogelmann J. E., Xu D., Wen W., Liu A.* Characterizing fragmentation of the collective forests in southern China from multitemporal Landsat imagery: A case study from Kecheng district of Zhejiang province // Applied Geography. 2011. V. 31. Iss. 3. P. 1026–1035. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.02.004.
- Liu J., Coomes D.A., Gibson L., Hu G., Liu Jn., Luo Y., Wu C., Yu M. Forest fragmentation in China and its effect on biodiversity // Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society. 2019. V. 94. No. 5. P. 1636–1657. DOI: 10.1111/brv.12519.
- 30. *McGarigal K., Marks B.J.* Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General technical report. PNW-GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995. 122 p. https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf.
- Neel M. C., McGarigal K., Cushman S. A. Behavior of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area // Landscape Ecology. 2004. V. 19. P. 435–455. DOI: 10.1023/B:LAND.0000030521.19856.cb.
- 32. Newton A. C., Hill R.A., Echeverria C., Golicher D., Rey Benayas J. M., Cayuela L., Hinsley S.A. Remote sensing and the future of landscape ecology // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2009. V. 33. Iss. 4. P. 528–546. DOI: 10.1177/0309133309346882.
- 33. *Pyngrope O. R., Kumar M., Pebam R., Singh S. K., Kundu A., Lal D.* Investigating forest fragmentation through earth observation datasets and metric analysis in the tropical rainforest area // SN Applied Sciences. 2021. V. 3. Art. No. 705. 17 p. DOI: 10.1007/s42452-021-04683-5.
- 34. *Reddy C. S., Sreelekshmi S., Jha C. S., Dadhwal V. K.* National assessment of forest fragmentation in India: Landscape indices as measures of the effects of fragmentation and forest cover change // Ecological Engineering. 2013. V. 60. P. 453–464. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.064.
- 35. *Remmel T. K.*, *Csillag F.* When are two landscape pattern indices significantly different? // J. Geographic Information System. 2003. V. 5. P. 331–351. DOI: 10.1007/s10109-003-0116-x.
- Singh J. S., Roy P. S., Murthy M. S. R., Jha C. S. Application of landscape ecology and remote sensing for assessment, monitoring and conservation of biodiversity // J. Indian Society of Remote Sensing. 2010. V. 38. P. 365–385. DOI: 10.1007/s12524-010-0033-7.
- 37. *Slattery Z., Fenner R.* Spatial analysis of the drivers, characteristics, and effects of forest fragmentation // Sustainability. 2021. V. 13. No. 6. Art. No. 3246. DOI: 10.3390/su13063246.
- 38. Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Lezhnin S. A., Dergunov D. M., Tarasova L. V. Monitoring and assessment of forest cover disturbance in the Middle Volga region of Russia using Landsat images // IOP "FORECO 2021" Conf. Ser.: Earth and Environmental Sciences. 2021. V. 932. Art. No. 012007. DOI: 10.1088/1755-1315/932/1/012007.

- Wulder M. A., White J. C., Han T., Coops N. C., Cardille J. A., Holland T., Grills D. Monitoring Canada's forests. Part 2: national forest fragmentation and pattern // Canadian J. Remote Sensing. 2008. V. 34. No. 6. P. 563–584. DOI: 10.5589/m08-081.
- Xue X., Hualin X., Yuanhua F. Spatiotemporal patterns and drivers of forest change from 1985–2000 in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China // J. Resources and Ecology. 2016. V. 7. No. 4. P. 301–308. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2016.04.009.

Spatio-temporal analysis of forest cover in the Middle Volga using landscape indices and Landsat satellite data

O. N. Vorobyov, E. A. Kurbanov, S. A. Lezhnin, A. V. Gubayev, D. M. Dergunov, L. V. Tarasova

Volga State University of Technology, Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing, Yoshkar-Ola 424000, Russia E-mail: kurbanovea@volgatech.net

The study analyzes the dynamics of forest cover fragmentation in the Middle Volga region of Russian Federation based on the data of 18 multi-temporal Landsat images of 1985, 2001, and 2021 and 11 landscape indices (metrics). For this, two time periods of the spatio-temporal distribution of forest cover between 1985-2001 and 2002-2022 were analyzed using the FRAGSTATS software (version 4.2) and ArcGIS Pro. To obtain detailed maps for 15 land cover (vegetation) classes, Landsat images were consecutively classified using the stepwise unsupervised and supervised classification methods. The main attention was paid to the comparative assessment of landscape indices, which describe the fragmentation of the forest cover structure: forest area, patch and edge density, mean patch size, mean shape index, and proximity index distribution of forest plots. The analysis of landscape indices showed that in 1985–2001, on the territory of Middle Volga there was a trend towards an increase in forest fragmentation. Meanwhile in 2002–2022, the process of aggregation of forest areas takes place, which indicates the opposite trend - a decrease in forest cover fragmentation. The research results allow us to conclude that agricultural activity, urbanization and the development of transport infrastructure remain the driving forces of forest fragmentation in the Middle Volga region. The proposed methodology and algorithm is a useful tool for quantitative assessment of complex ecosystem processes and can be used as an effective means of monitoring the implementation of sustainable forest management indicators.

Keywords: forest fragmentation, landscape indices, Middle Volga region, forest ecosystems, classification, Landsat, spatial analysis, FRAGSTATS

> Accepted: 13.01.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-144-159

References

- 1. Vorobiev O.N., Kurbanov E.A., Polevshikova Y.A., Lezhnin S.A., Assessment of dynamics and disturbance of forest cover in the Middle Povolzhje by Landsat images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 124–134 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-124-134.
- 2. Kudryavtsev A. Yu., Transformation of forest ecosystems in the forest-steppe zone of the middle Volga region, *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*, 2021, Vol. 5, No. 2, pp. 57–85 (in Russian).
- 3. Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., *Distantsionnye metody v lesnom khozyaistve* (Remote sensing in forestry), Ioshkar-Ola: Volgatech, 2020, 266 p. (in Russian).
- Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Nezamaev S.A., Aleksandrova T.A., Estimation of reforestation on abandoned agricultural lands in Republic Mari El with the use of satellite images, *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie, 2010, No. 2, pp. 14–20 (In Russian).

- Kurbanov E. A., Vorobiev O. N., Gubayev A. V., Lezhnin S. A., Polevshikova Yu. A., Assessment of accuracy and comparability of forest cover thematic maps of different spatial resolution by example of Middle Povolzhje, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 36–48 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-36-48.
- 6. Revutskaya O. L., Fetisov D. M., Spatial distribution of game animals in the Jewish autonomous region depending on the forest coverage of the territory, *Regional'nye problemy*, 2015, Vol. 18, No. 4, pp. 52–59 (in Russian).
- 7. Ukrainskii P.A., Terekhin E.A., Pavlyuk Ya.V., Fragmentation of forests in the upper part of the Vorskla River basin since the end of the 18th century, *Vestnik Moskovskogo universiteta*, *Ser. 5: Geografiya*, 2017, Vol. 1, No. 1, pp. 82–91 (in Russian).
- 8. Abdullah S.A., Nakagoshi N., Forest fragmentation and its correlation to human land use change in the state of Selangor, peninsular Malaysia, *Forest Ecology and Management*, 2007, Vol. 241, Issues 1–3, pp. 39–48, DOI: 10.1016/j.foreco.2006.12.016.
- 9. Armenteras D., Gonzales T. M., Retana J., Forest fragmentation and edge influence on fire occurrence and intensity under different management types in Amazon forests, *Biological Conservation*, 2013, Vol. 159, pp. 73–79, DOI: 10.1016/j.biocon.2012.10.026.
- Baumann M., Ozdogan M., Kuemmerle T., Wendland K.J., Esipova E., Radeloff V.C., Using the Landsat record to detect forest-cover changes during and after the collapse of the Soviet Union in the temperate zone of European Russia, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 124, pp. 174–184, DOI: 10.1016/j. rse.2012.05.001,
- 11. Castelletta M., Thiollay J., Sodhi N., The effects of extreme forest fragmentation on the bird community of Singapore Island, *Biological Conservation*, 2005, Vol. 121, Issue 1, pp. 135–155, DOI: 10.1016/j. biocon.2004.03.033.
- 12. Castillo E. M., García-Martin A., Aladrén L. A. L., de Luis M., Evaluation of forest cover change using remote sensing techniques and landscape metrics in Moncayo natural park (Spain), *Applied Geography*, 2015, Vol. 62, pp. 247–255, DOI: 10.1016/j.apgeog.2015.05.002.
- 13. Duro D. C., Coops N. C., Wulder M. A., Han T., Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2007, Vol. 31, Issue 3, pp. 235–260, DOI: 10.1177/0309133307079054.
- 14. Echeverria C., Coomes D.A., Salas J., Rey-Benayas J. M., Lara A., Newton A.C., Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests, *Biological Conservation*, 2006, Vol. 130, Issue 4, pp. 481–494, DOI: 10.1016/j.biocon.2006.01.017.
- 15. Echeverria C., Coomes D.A., Hall M., Newton A.C., Spatially explicit models to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile, *Ecological Modelling*, 2008, Vol. 212, Issues 3–4, pp. 439–449, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2007.10.045.
- Ewers R. M., Kliskey A. D., Walker S., Rutledge D., Harding J. S., Didham R. K., Past and future trajectories of forest loss in New Zealand, *Biological Conservation*, 2006, Vol. 133, pp. 312–325, DOI: 10.1016/j. biocon.2006.06.018.
- 17. Flowers B., Huang K. T., Aldana G. O., Analysis of the habitat fragmentation of ecosystems in Belize using landscape metrics, *Sustainability*, 2020, Vol. 12, Art. No. 3024, 14 p., DOI: 10.3390/su1207302.
- 18. Fynn I. E.M., Campbell J., Forest fragmentation analysis from multiple imaging formats, *J. Landscape Ecology*, 2019, Vol. 12, Art. No. 1, 15 p., DOI: 10.2478/jlecol-2019-0001.
- Haddad N. M., Brudvig L. A., Clobert J., Davies K. F., Gonzalez A., Holt R. D., Lovejoy T. E., Sexton J. O., Austin M. P., Collins C. D., Cook W. M. et al., Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems, *Science Advances*, 2015, Vol. 1, Issue 2, Art. No. e1500052, DOI: 10.1126/ sciadv.1500052.
- Healey S. P., Healey S. P., Cohen W. B., Zhiqiang Y., Krankina O. N., Comparison of tasseled cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 97, Issue 3, pp. 301–310, https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.05.009.
- 21. Heilman G. E., Strittholt J. R., Slosser N. C., Dellasala D. A., Forest fragmentation of the conterminous United States: assessing forest intactness through road density and spatial characteristics: forest fragmentation can be measured and monitored in a powerful new way by combining remote sensing, geographic information systems, and analytical software, *BioScience*, 2002, Vol. 52, pp. 411–422.
- 22. Hermosilla T., Wulder M.A., White J.C., Coops N.C., Pickell P.D., Bolton D.K., Impact of time on interpretations of forest fragmentation: Three-decades of fragmentation dynamics over Canada, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 222, pp. 65–77, DOI: 10.1016/j.rse.2018.12.027.
- 23. Kukkonen M., Kayhko N., Spatio-temporal analysis of forest changes in contrasting land use regimes of Zanzibar, Tanzania, *Applied Geography*, 2014, Vol. 55, pp. 193–202, DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.09.013.
- 24. Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S., Sha J., Wang J., Li X., Cole J., Dergunov D., Wang Y., Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: a review, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 19, Art. No. 4714, DOI: 10.3390/rs14194714.

- 25. Lai S., El-Adawy A., Sha J., Li X., Wang J., Kurbanov E., Lin Q., Towards an integrated systematic approach for ecological maintenance: Case studies from China and Russia, *Ecological Indicators*, 2022, Vol. 140, Art. No. 108982, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108982.
- Legarreta-Miranda C. K., Prieto-Amparán J. A., Villarreal-Guerrero F., Morales-Nieto C. R., Pinedo-Alvarez A., Long-term land-use/land-cover change increased the landscape heterogeneity of a fragmented temperate forest in Mexico, *Forests*, 2021, Vol. 12, Issue 8, Art. No. 1099, 14 p., DOI: 110.3390/f12081099.
- Leimgruber P., Kelly D., Steininger M., Brunner J., Muller T., Songer M., Forest cover change patterns in Myanmar (Burma) 1990–2000, *Environmental Conservation*, 2005, Vol. 32, No. 4, pp. 356–364, DOI: 10.1017/S0376892905002493.
- Li M., Zhu Z., Vogelmann J. E., Xu D., Wen W., Liu A., Characterizing fragmentation of the collective forests in southern China from multitemporal Landsat imagery: A case study from Kecheng district of Zhejiang province, *Applied Geography*, 2011, Vol. 31, Issue 3, pp. 1026–1035, DOI: 10.1016/j. apgeog.2011.02.004.
- 29. Liu J., Coomes D.A., Gibson L., Hu G., Liu Jn., Luo Y., Wu C., Yu M., Forest fragmentation in China and its effect on biodiversity, *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Sciety*, 2019, Vol. 94, No. 5, pp. 1636–1657, DOI: 10.1111/brv.12519.
- McGarigal K., Marks B.J., Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure, General technical report, PNW-GTR-351, Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995, 122 p., https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf.
- Neel M. C., McGarigal K., Cushman S.A., Behavior of class-level landscape metrics across gradients of class aggregation and area, *Landscape Ecology*, 2004, Vol. 9, pp. 35–455, DOI: 10.1023/B:LAND.0000030521.19856.cb.
- Newton A. C., Hill R.A., Echeverria C., Golicher D., Rey Benayas J. M., Cayuela L., Hinsley S.A., Remote sensing and the future of landscape ecology, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2009, Vol. 33, Issue 4, pp. 528–546, DOI: 10.1177/0309133309346882.
- 33. Pyngrope O. R., Kumar M., Pebam R., Singh S. K., Kundu A., Lal D., Investigating forest fragmentation through earth observation datasets and metric analysis in the tropical rainforest area, *SN Applied Sciences*, 2021, Vol. 3, Art. No. 705, 17 p., DOI: 10.1007/s42452-021-04683-5.
- Reddy C. S., Sreelekshmi S., Jha C. S., Dadhwal V. K., National assessment of forest fragmentation in India: Landscape indices as measures of the effects of fragmentation and forest cover change, *Ecological Engineering*, 2013, Vol. 60, pp. 453–464, DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.064.
- 35. Remmel T. K., Csillag F., When are two landscape pattern indices significantly different? J. Geographic Information System, 2003, Vol. 5, pp. 331–351, DOI: 10.1007/s10109-003-0116-x.
- Singh J. S., Roy P. S., Murthy M. S. R., Jha C. S., Application of landscape ecology and remote sensing for assessment, monitoring and conservation of biodiversity, *J. Indian Society of Remote Sensing*, 2010, Vol. 38, pp. 365–385, DOI: 10.1007/s12524-010-0033-7.
- 37. Slattery Z., Fenner R., Spatial analysis of the drivers, characteristics, and effects of forest fragmentation, *Sustainability*, 2021, Vol. 13, No. 6, Art. No. 3246, DOI: 10.3390/su13063246.
- Vorobev O. N., Kurbanov E. A., Lezhnin S. A., Dergunov D. M., Tarasova L. V., Monitoring and assessment of forest cover disturbance in the Middle Volga region of Russia using Landsat images, *IOP "FORECO 2021" Conf., Ser.: Earth and Environmental Sciences*, 2021, Vol. 932, Art. No. 012007, DOI: 10.1088/1755-1315/932/1/012007.
- Wulder M. A., White J. C., Han T., Coops N. C., Cardille J. A., Holland T., Grills D., Monitoring Canada's forests. Part 2: national forest fragmentation and pattern, *Canadian J. Remote Sensing*, 2008, Vol. 34, No. 6, pp. 563–584, DOI: 10.5589/m08-081.
- Xue X., Hualin X., Yuanhua F., Spatiotemporal patterns and drivers of forest change from 1985–2000 in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China, *J. Resources and Ecology*, 2016, Vol. 7, No. 4, pp. 301–308, DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2016.04.009.