

УДК 502.335:504.062

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2025-3-22-33>

Территориальные аспекты антропогенной фрагментации Тверской области (на основе данных OpenStreetMap)

Д.В. Папилин, Ю.В. Преображенский

ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов

Фрагментация естественных и антропогенных ландшафтов представляет собой комплексную проблему, имеющую отношение как к экологическим, так и хозяйственным компонентам пространственной общественно-природной системы. В пределах региона фрагментация фиксируется как результат проявления природных и антропогенных рубежей. В пределах территории Тверской области на основе открытых геоданных выявлены основные оси антропогенного воздействия и зоны с различной степенью ландшафтной фрагментации. Создан иллюстративный материал по доле застройки и площади лесов в пределах ячеек гексагональной решетки. Показана связь фрагментации территории с разнообразием природопользования на ней.

Ключевые слова: природопользование, открытые данные, OpenStreetMap, Тверская область, фрагментация ландшафта, плотность транспортной сети.

Введение

Фрагментацию территории природными рубежами контрастности [1], дорожно-транспортной сетью, а также выраженными границами антропогенных ландшафтов можно рассматривать как своего рода папиллярный узор, уникальный для каждой местности, каждого региона. Фрагментация свидетельствует об интенсивности антропогенной нагрузки на территориальные системы региона, а её пространственные различия дают представление о морфологии пространственной общественно-природной системы (ПОПС) региона. В то же время, фрагментацию можно рассматривать с позиции проблемного подхода – прежде всего это касается природоохранного вида природопользования. В этом контексте можно обсуждать достаточность и чрезмерность фрагментации. Комплексная сущность проявления фрагментации исследуется разными авторами с разных сторон: с позиции развития линейной инфраструктуры и экологического влияния. Интеграция этих направлений, осуществлённая первоначально в масштабе региона (на мезоуровне) позволит расширить представление о пространственных особенностях ПОПС.

© Папилин Д.В.,
Преображенский Ю.В., 2025

Задача оценки степени фрагментации естественных и антропогенноизменённых ландшафтов региона решалась на основе использования данных дистанционного зондирования (ДДЗ) Земли и их обработки с помощью геоинформационных систем (ГИС). Помимо ДДЗ в настоящем исследовании использованы открытые геоданные проекта OpenStreetMap (OSM).

Целью работы является анализ степени фрагментации территории Тверской области. Задачи исследования включают: разработку методики сбора, обработки и анализа данных; расчет и картографирование плотности антропогенной инфраструктуры, степени фрагментации территории; а также анализ пространственных закономерностей развития ПОПС в пределах Тверской области.

Теоретические и методические основы исследования. Процесс фрагментации тесным образом связан с феноменом разнообразия объектов, деятельности и явлений в ПОПС. Б.Б. Родоман полагал, что «признаком развития какой-либо системы может служить увеличение разнообразия её элементов» [4, с.48]. В ландшафтоведении используется индекс относительного богатства ландшафтов, в экономической географии чаще исследуется диверсификация социально-экономической деятельности. В методологическом отношении необходима разработка комбинации этих методов. Фрагментация является и фактором, и следствием увеличения разнообразия территории. С одной стороны, физико-географические предпосылки в виде природных рубежей контрастности обуславливают территориальную структуру расселения населения и его хозяйственной деятельности, с другой, – в ходе формирования антропогенных ландшафтов происходит их обособление друг от друга и процесс привязки к хозяйственному узлу (формируется нодальный микрорайон). Для естественных ландшафтов фрагментация в виде линейной инфраструктуры даёт эффект экотонов, рождает градиенты физического и химического воздействия в удалении от неё.

В настоящей работе фрагментация понимается как процесс дробления естественных и антропогенных ландшафтов. Основными факторами фрагментации выступают развитие транспортной инфраструктуры, пространственное расширение (или сжатие) антропогенных ландшафтов, в том числе сельскохозяйственных, лесохозяйственных, селитебных. Фрагментация приводит к нарушению связности местообитаний, сокращению популяций, изменению экологических процессов и снижению биоразнообразия. Для количественной оценки фрагментации используются различные индексы, самый, вероятно, известный из которых, эффективный размер «ячейки» (MEFF), предложен Й. Ягером [9]. Подход на основе данного индекса активно используется в зарубежных исследованиях [5]. В работах отечественных авторов подобных работ не так много (см.,

например, анализ степени фрагментации Саратовской области [3]). Чаще всего феномен фрагментации рассматривается с позиции препятствования созданию завершённого природно-экологического каркаса, например, при оценке непрерывности экологических коридоров. Эти исследования подчеркивают важность сохранения и восстановления связности ландшафтов для поддержания биоразнообразия и экологической устойчивости территорий.

Фрагментация может рассматриваться на разных таксономических пространственных уровнях (см. таблицу).

Таблица

Основные фрагментирующие геопространственные объекты на разных таксономических уровнях

Уровень	Основные рубежи антропогенного происхождения	Основные рубежи естественного происхождения
Надрегиональный	Урбанизированный каркас с узлами, представленными первыми и вторыми городами регионов (грубо: людностью более 250 тыс. жителей)	Крупные природные рубежи контрастности: крупнейшие реки, горные системы, границы природных зон
Региональный (мезоуровень)	Урбанизированный каркас с включением городов любой людности, наиболее значимые объекты линейной инфраструктуры (линии электропередач, трубопроводы)	Рубежи контрастности, представленные сравнительно меньшими оро- и гидрографическими объектами, границы ландшафтных провинций
Микроуровень	Любые линейные объекты, созданные в ходе хозяйственной деятельности, границы между антропогенными ландшафтами разного вида	Мезорельеф, границы природных ландшафтов разного вида

Основным методологическим приёмом для исследования фрагментации, прежде всего оценки интенсивности её проявления, является разбиение территории исследования на ячейки и подсчёт дробных частей, образовавшихся в результате фрагментации, в границах каждой ячейки. Большое значение здесь имеет форма и размер ячейки, а также атрибутирование объектов в ячейках, с которых считывается информация для исследования. Это необходимо обговорить подробнее. Форма ячейки в абсолютном большинстве случаев представляет собой

квадрат или шестиугольник (гексагональную фигуру или «гексагон» – складывающийся на глазах профессиональный жаргонизм), последний вариант, наиболее приближённый к кругу и покрывающий всю поверхность без зазоров, безусловно, является лучшим вариантом для применения в методиках данного направления исследований. Размер ячейки определённо может варьировать для разных уровней исследования и зависит от плотности привязанной к территории информации: ячейки не могут быть пустыми. Поэтому на каждом уровне ячейки подбираются таким образом, чтобы содержать хотя бы один рубеж контрастности, одну границу.

Наконец, ключевой проблемой является тип географических объектов, с которых «снимается» информация и объём информации. При использовании ДДЗ необходима обработка геоинформации, её оцифровка и делимитация, которая, может осуществляться с разной степенью полноты и точности. По космоснимку можно с высокой точностью идентифицировать здание, но определить, является ли оно жилым домом, офисным центром или промышленным сооружением, исключительно на основе данных ДДЗ, затруднительно. Применённый нами в предшествующем исследовании [3] метод атрибутирования геообъектов на основе открытых данных OSM существенно лучше показывает себя в отношении антропогенных объектов. Тем не менее, на настоящий момент набор данных OSM представляется нам наиболее подходящим для решаемых задач.

Материалы и методы исследования.

Информационной основой для анализа послужили открытые геоданные проекта OSM, доступные на сентябрь 2023 года. Эти данные собраны многочисленными добровольцами и энтузиастами и представляют собой т.н. Volunteered Geographic Information. Методология исследования включала несколько этапов.

На первом был делимитирован объект исследования (Тверская область) на основе данных OSM. Использование ГИС позволило покрыть всю территорию области гексагональной решеткой с площадью ячейки 195 км².

На втором этапе из базы данных OSM были извлечены данные, имеющие отношение к транспортной инфраструктуре региона, застройке и лесным массивам.

На третьем этапе для сравнительного анализа ячеек гексагональной решетки были рассчитаны значения индексов по некоторым показателям для каждой ячейки. По формуле, предложенной Й.Ягером [9] вычислялся региональный MEFF. Для этого из полигона всей Тверской области были вычтены зоны, построенные вокруг всех автомобильных и железных дорог. Полученная территория, состоящая из

множества несвязанных ландшафтных фрагментов, была проанализирована по формуле:

$$MEFF_{reg} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^2}{A_{total}},$$

где A_i – площадь i -го нефрагментированного участка в пределах всего региона, A_{total} – общая площадь региона, n – количество непрерывных контуров. В результате было получено достаточно высокое значение – 701,9 км². Оно позволило сопоставить M_{reg} с площадью типовой ячейки в наложенной нами гексагональной решетки (195 км²).

Далее для каждой гексагональной ячейки сетки был рассчитан локальный MEFF. Процедура была аналогична, но проводилась в пределах одной ячейки: из полигона ячейки вычитались зоны только тех дорог, которые её пересекают. Формула локальной эффективной ячейки имеет вид:

$$MEFF_{loc} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^2}{A_{cell}},$$

где A_i – площадь i -го дробного участка (контура) в пределах ячейки, A_{cell} – общая площадь ячейки (гексагона), n – количество непрерывных контуров.

Важнейший для фрагментации показатель плотности транспортной сети рассчитывалась как отношение суммарной длины автомобильных дорог в пределах ячейки (км) к площади ячейки (км²), согласно формуле:

$$D_{road} = \frac{L_{total}}{A_{cell}},$$

где L_{total} – общая длина автодорог в ячейке (км), A_{cell} – площадь ячейки (км²).

Плотность застройки вычислялась как процентное отношение суммарной площади полигонов зданий в ячейке к общей площади ячейки:

$$D_{build} = \left(\frac{A_{buildings_total}}{A_{cell_total}} \right) \times 100,$$

где $A_{buildings_total}$ – суммарная площадь зданий, а A_{cell_total} – общая площадь ячейки.

На заключительном этапе работы была проведена визуализация и анализ данных и результатов расчётов, приведённых выше индексов.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенное исследование, основанное на анализе открытых геоданных OSM, позволило дать комплексную оценку ландшафтной фрагментации Тверской области и выявить ключевые пространственные закономерности антропогенной трансформации её ландшафтов. Результаты демонстрируют значительную неоднородность территории,

обусловленную историческими, экономическими и природными факторами.

Индекс локальной эффективной ячейки $MEFF_{loc}$ продемонстрировал сравнительно низкие значения (рис.1). Ячейки с наибольшими значениями индекса окружают города Бежецк и Нелидово. Самый крупный кластер состоит из шести граничащих наименее фрагментированных ячеек.

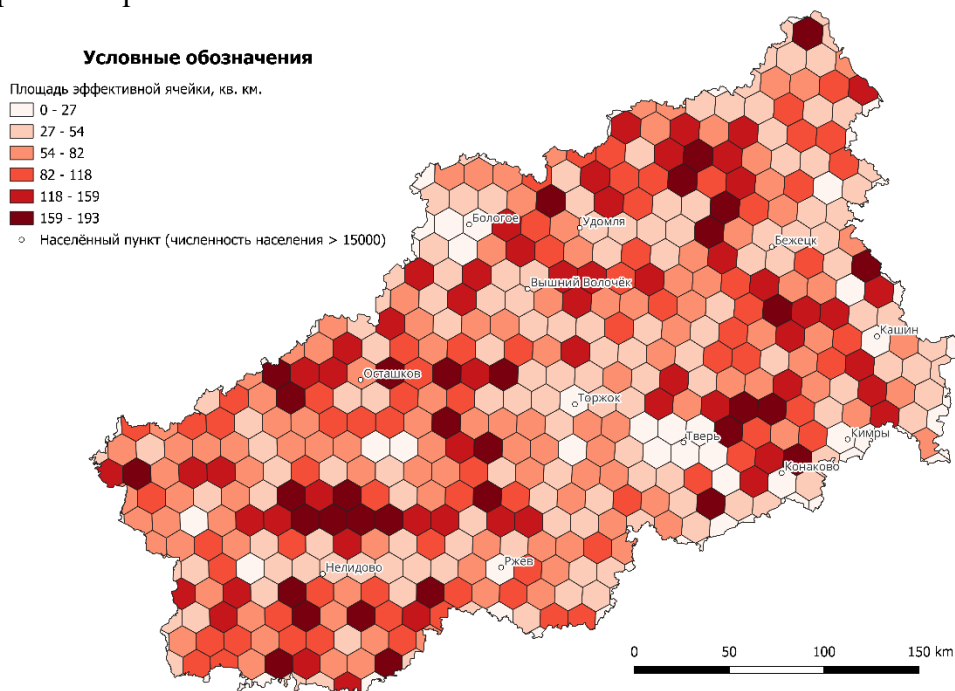


Рис. 1. Площадь эффективной ячейки по выделенным ячейкам в Тверской области (составлено авторами по расчётам на основе данных OSM)

Эти зоны являются наиболее целостными и экологически ценными в рамках общей освоенной территории. К ним относятся обширные лесоболотные комплексы на юго-западе, включая территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника, а также малонаселенные районы на севере и западе области. Эти территории выполняют важнейшую функцию сохранения экологического каркаса региона, являясь резерватами биоразнообразия. Их ландшафтная структура характеризуется доминированием крупных лесных массивов, здесь низкая плотность дорог и практически полное отсутствие застройки.

На этом фоне остальная территория области демонстрирует различную степень относительной фрагментации. Карта распределения значений этого показателя позволяет четко выделить зоны с наибольшим

нарушением целостности (значения индекса < 54), которые соответствуют главным урбанизированным центрам. Эти территории, окрашенные в наиболее светлые тона, являются очагами существенного антропогенного воздействия. Для большей части территории региона значения индекса в ячейках колеблется от 54 до 118 км², что необходимо оценивать, как с хозяйственных, так и с экологических позиций. Это обширные территории с умеренной и слабой степенью фрагментации, представляющие собой переходный, в слабой и умеренной степени антропогенно трансформированный ландшафт. Он зажат между двумя антагонистичными структурами – урбанизированными осями и природными резерватами.

При анализе плотности автомобильных дорог (рис. 2) проступают очертания урбанизированного каркаса, как регионального, так и надрегионального. В частности, последнее касается оси каркаса, протянувшейся между двумя столицами. Максимальные значения плотности транспортной сети формируют линейно-узловую структуру, совпадающую с главными транспортными артериями федерального значения (М-9 «Балтия», М-10 «Россия», М-11 «Нева») и их пересечениями в районе крупных городов, таких как Тверь, Ржев и Вышний Волочек.

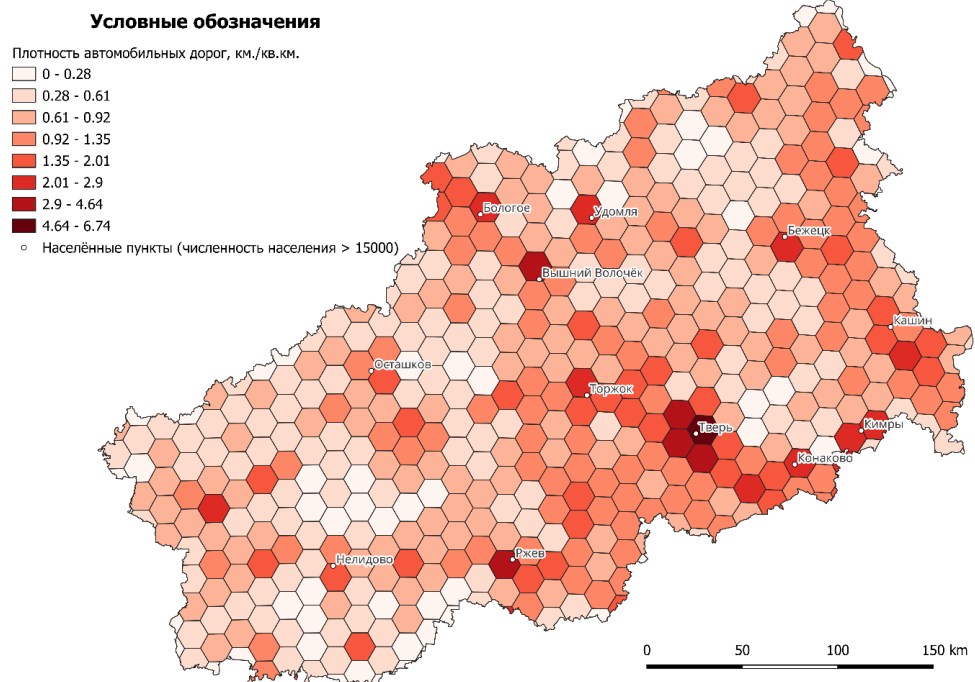


Рис. 2. Плотность автомобильных дорог по выделенным ячейкам в Тверской области, км/км² (составлено авторами по расчётам на основе данных OSM)

Именно эти «оси воздействия» выступают основными драйверами дробления ландшафта, что согласуется с выводами ряда исследований зарубежных экологов, подчёркивающих ключевую роль транспортной инфраструктуры в этом процессе (см., например, [8, 10]), и подтверждается минимальными значениями локального индекса эффективной ячейки ($MEFF_{loc}$) в прилегающих к ним ячейках. Плотность застройки (рис.3), в свою очередь, является точным индикатором ядер урбанизации, которым соответствуют зоны максимального антропогенного воздействия.

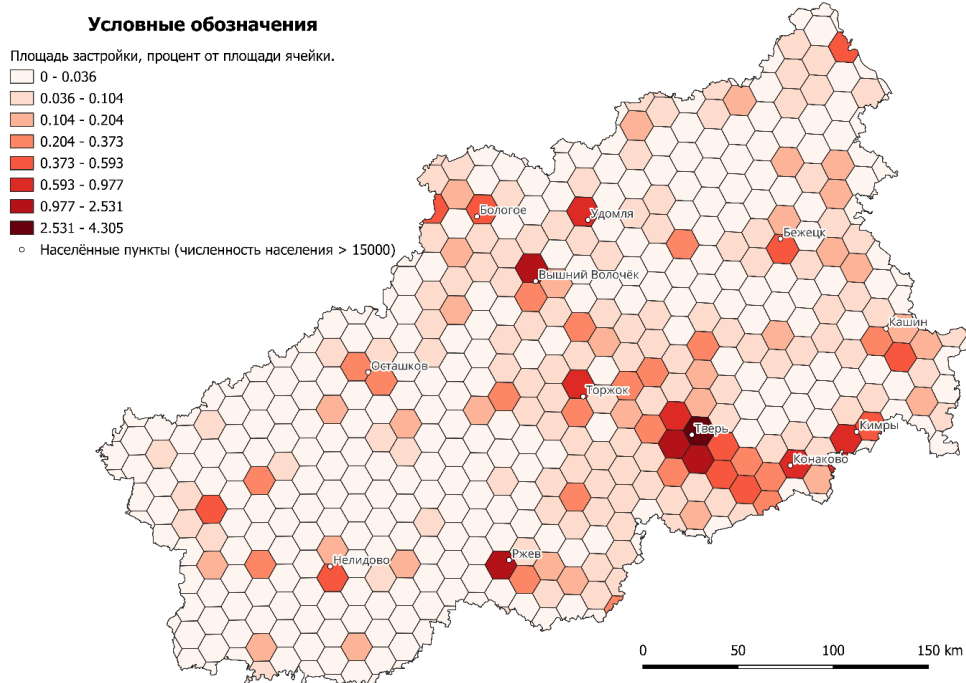


Рис.3. Площадь застройки по выделенным ячейкам в Тверской области (индекс D_{build}), % (составлено авторами по расчётам на основе данных OSM)

Территории с высокой плотностью дорог, преимущественно в центральной и юго-восточной частях, очевидно, испытывают наибольшую фрагментацию. В этих зонах, как показано в нашей работе [2], наблюдается высокое разнообразие природопользования и высокие значения индекса Шеннона. Это свидетельствует о гетерогенной структуре землепользования, включающей жилые, промышленные, рекреационные зоны и ненарушенные природные фрагменты. Такая мозаичность часто является прямым следствием антропогенной фрагментации, которая создает множество мелких, разнообразных по использованию участков на месте некогда однородных естественных ландшафтов [7].

Сельскохозяйственные земли сконцентрированы в южной, юго-восточной и центральной частях области, где исторически сложились центры сельскохозяйственного производства и природные условия более благоприятны. Эти аграрные территории характеризуются умеренными показателями количества типов природопользования и разнообразия, отражая сочетание пахотных земель, пастбищ, сельских населенных пунктов и участков естественного ландшафта.

Интенсивное антропогенное освоение, развитие дорожной сети и преобладание агроландшафтов или мозаичного землепользования способствуют снижению связности природных комплексов. Напротив, наименее фрагментированные ландшафты характерны для периферийных западных, северо-западных и, в меньшей степени, северо-восточных районов области. Здесь доминируют крупные лесные массивы (рис. 4), низкая плотность дорог, и, как следствие, наблюдается меньшее количество типов природопользования и более низкий индекс относительного богатства в ячейках.

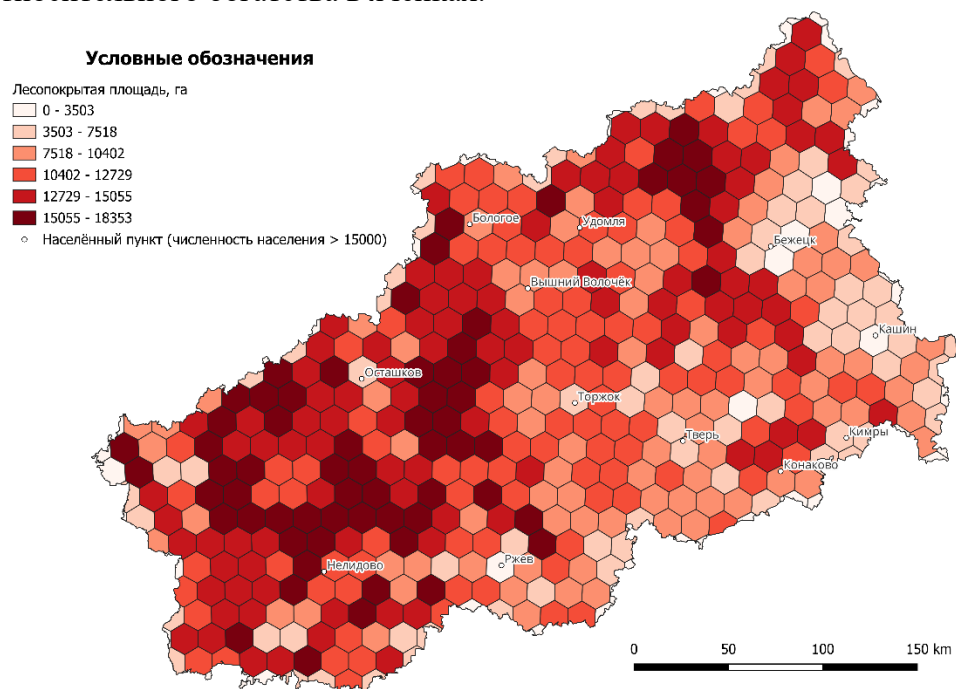


Рис.4. Площадь лесопокрытой территории, по ячейкам в пределах Тверской области (составлено авторами на основе данных OSM)

Анализ территориальной структуры лесного покрова в таких зонах показывает, что, несмотря на потенциально высокую общую лесистость, лесные массивы часто «нарезаны» на большое количество пятен среднего и малого размера. Это свидетельствует о снижении

экологической связности и потенциальных рисках для популяций видов, требующих крупных и непрерывных местообитаний.

Таким образом, даже в относительно благополучных с точки зрения общей площади лесов районах, их внутренняя структура может быть значительно нарушена, что подчеркивает важность учета не только количественных, но и структурных показателей при оценке состояния ландшафтов. Полученные результаты могут служить основой для ландшафтного планирования, выявления территорий, требующих первоочередных природоохранных мер, и определения ключевых зон для поддержания экологической стабильности региона.

В целом, учитывая весь набор графических материалов этой и предшествующей статьи [3], можно сделать несколько выводов о морфологии антропогенных ландшафтов и фрагментированных участках региона. Бóльшая сохранность природных комплексов в западных и северо-западных районах области, сравнительно большая лесистость, низкая плотность дорог, меньшее разнообразие природопользования в гексагональных ячейках указывает на меньшую фрагментацию и большую однородность ландшафтов в этой части региона. Напротив, центральные, южные и юго-восточные территории, тяготеющие к Московской агломерации и основным транспортным осям, испытывают более значительную антропогенную нагрузку. Это выражается в высокой плотности транспортной сети, интенсивной застройке, активном сельскохозяйственном использовании, что приводит к увеличению количества типов природопользования на единицу площади и повышению индекса относительного богатства, отражая высокую степень мозаичности и фрагментации ландшафтов.

Линейные элементы инфраструктуры (автомобильные и железные дороги) выступают основными факторами фрагментации естественных и в минимальной степени затронутых влиянием человека ландшафтов, формируя коридоры интенсивного освоения. Гидрографическая сеть, особенно крупные реки (Волга, Западная Двина, Медведица, Молога) и система озер и водохранилищ, оказывает существенное влияние на формирование ландшафтной структуры, являясь одновременно важными экологическими коридорами и зонами рекреационной и хозяйственной активности, вокруг которых также часто наблюдается повышенное разнообразие типов землепользования.

Заключение. Авторы понимают проблему обособленного анализа отдельного российского региона, из которого сложно сделать вывод о типичности или же, напротив, уникальности исследуемого процесса фрагментации ПОПС. Социально-демографические и экономические процессы последних десятилетий привели к сжатию освоенного пространства области, она является одним из лидеров в стране по числу населённых пунктов без населения (подробнее о трансформации систем

расселения региона см. [6]). Логично было бы ожидать, что в результате уменьшится и степени фрагментации территории региона. Сохраняются самые главные линейные элементы урбанизированного каркаса, тогда как оси второго и третьего порядка отпадают.

Сложный характер трансформации ПОПС, увеличение фрагментации и разнообразия антропогенной деятельности необходимо рассматривать как комплексную научную проблему, затрагивающую и социально-экономический, и экологический аспекты в жизни общества на определённой территории.

Приведённые и предложенные нами индексы позволили дополнить представление о проявлении фрагментации и разнообразии природопользования в пределах конкретной ПОПС, сложившейся на мезоуровне (территории Тверской области).

Список литературы

1. Зырянов А.И. Регион: пространственные отношения природы и общества. Пермь, Перм. ун-т, 2006. 372 с.
2. Преображенский Ю.В., Михайлова Е.В. Фрагментация ландшафтов в развитии общественно-природных геосистем Саратовской области // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2015. № 36 (1). С. 19–22.
3. Папилин Д.В., Преображенский Ю.В. Анализ территориальной структуры природопользования Тверской области на основе открытых геоданных OpenStreetMap // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2025. № 3 (51). С. 11–21. – DOI 10.26456/2226-7719-2025-3-11-24.
4. Родоман Б. Б. Территориальные ареалы и сети. Очерки теоретической географии. Смоленск: Ойкумена, 1999. 256 с.
5. Скачкова А. С., Яцухно В. М. Планирование территориальных схем экологических сетей на основе результатов оценки фрагментации и разнообразия ландшафтов // Земля Беларуси. 2016. № 4. С. 24–29.
6. Смирнова А.А., Смирнов И.П., Ткаченко А.А. Расселение: основные понятия, подходы, результаты исследований. Тверь: Тверской государственный университет, 2024. 224 с.
7. Fahrig L., Baudry J., Brotons L., Burel F.G., Crist T.O., Fuller R.J., Sirami C., Siriwardena G.M., Martin J.L. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes // Ecology Letters 2011 Vol. 14 No 2. P. 101–112. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2010.01559.x.
8. Forman R. T. T., Alexander L. E. Roads and their major ecological effects // Annual Review of Ecology and Systematics. 1998. Vol. 29, No 1. P. 207–231.
9. Jaeger J. A. G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation // Landscape Ecology. 2000. Vol. 15, No 2. P. 115–130.

10. Ibisch P.L., Hoffmann M.T., Kreft S., Pe'er G., Kati V., Biber-Freudenberger L., DellaSala D.A., Vale M.M., Hobson P.R., Selva N. A global map of roadless areas and their conservation status // Science. 2016. Vol.354. No 6318. P.1423–1427. DOI: 10.1126/science.aaf7166. PMID: 27980208.

Об авторах:

ПАПИЛИН Дмитрий Вячеславович – магистрант ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), e-mail: dmitrypapilinv@mail.ru, ORCID: 0009-0001-2401-5392.

ПРЕОБРАЖЕНСКИЙ Юрий Владимирович – кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры экономической и социальной географии. ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), e-mail: topofag@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2774-0554, SPIN-код: 1437-7336.

Territorial aspects of anthropogenic fragmentation in the Tver region (based on OpenStreetMap data)

D.V. Papilin, Yu.V. Preobrazhenskiy

Saratov State University, Saratov

The fragmentation of natural and anthropogenic landscapes is a complex problem related to both ecological and economic components of the spatial socio-natural system. Within the region, fragmentation is recorded as a result of the manifestation of natural and anthropogenic boundaries. Based on open geodata for the Tver region, the main axes of anthropogenic impact and zones with varying degrees of landscape fragmentation have been identified. Illustrative material has been created on the proportion of built-up areas and forest cover within hexagonal grid cells. The relationship between the territory's fragmentation and the diversity of land use on it is demonstrated.

Keywords: *land use, open data, OpenStreetMap, Tver region, landscape fragmentation, transport network density.*

Рукопись поступила в редакцию 30.05.2025

Рукопись принята к печати 19.08.2025