

## ФРАГМЕНТАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ КАРАКАЛПАКСТАН

И. М. Сулайманов, Т. Х. Эримбетов, Б. Е. Абдикаиров

### АННОТАЦИЯ

В статье анализируется динамика фрагментации лесного покрова Республики Каракалпакстан по данным цифровых карт лесного покрова за 2015 и 2022 гг. на основе источников Sentinel-2. Для этого были проанализированы периоды процесса пространственно-временного распределения лесного покрова за 2015-2022 гг. с использованием программного обеспечения FRAGSTATS (версия 4.2) и ArcGIS Pro. С целью получения детальных карт на 8 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 Каракалпакстана за 2015-2022 гг. наблюдалась тенденция к увеличению фрагментации лесного покрова. Полученные результаты исследования могут быть использованы для выявления степени уязвимости лесных экосистем в Республике Каракалпакстана. Оценка фрагментации лесного покрова к внешним воздействиям антропогенного и природного характера, как и во всем мире, является одной из существующих проблем в Центрально-Азиатском регионе и, в частности, в Каракалпакии и Узбекистане. Фактически, в последние годы в Каракалпакстане не проводилось серьезных исследований по состоянию лесных ресурсов республики. Только 11 мая 2017 г. было принято постановление № 2966 об организации деятельности Государственного комитета Республики Узбекистан по лесному хозяйству. После этого правительство приняло ряд решений. И 16 апреля 2018 года внесены изменения и дополнения в Закон Республики Каракалпакстан «О лесе». Так как за последние годы 20 века в Республике Каракалпакстан осталось нереализованным очень многое в сфере лесного хозяйства, поэтому остаются актуальными и требуют решений и исследования многие вопросы. Необходим анализ множества факторов, позволяющих оценить состояние лесных экосистем в



комплексе, учитывая физико-географические и почвенно-климатические и социо экономические факторы. Одним из таких факторов является оценка фрагментации лесного покрова. Для проведения анализа фрагментации лесного покрова Каракалпакстана необходимо оценить пространственно-временную динамику лесного покрова за 2015–2022 гг.

**Ключевые слова:** Лесные экосистемы, фрагментация, Landsat, ГИС, тематические слои, индексы.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из негативных последствий влияния климатических изменений и антропогенного воздействия, ведущей к уменьшению биоразнообразия экосистем на территории Каракалпакстана, является чрезмерная фрагментация лесов, которая приводит к уменьшению устойчивости лесных экосистем. 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.

Большое количество исследований посвящены оценке фрагментации лесного покрова, с целью понимания пространственных закономерностей на уровне ландшафтов, анализу происходящих изменений и взаимодействия между элементами ландшафта с течением времени. Таким образом, фрагментация лесных насаждений— это один из главных признаков, подлежащих изучению при оценке лесных ландшафтов в различных масштабах, а также его структуры, функций и динамики. Кроме того, определение степени фрагментированности территории с помощью международных индексных показателей, одобренных ФАО, позволяет оценить уровень устойчивости лесных экосистем к внешним воздействиям.

**Целью исследования является** проведение комплексной оценки динамики фрагментации лесов Республики Каракалпакстан по спутниковым данным.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

1. Получены цифровые карты лесного покрова за 2015 и 2022 гг. на основе данных Sentinel-2.
2. Проведен анализ динамики фрагментации лесного покрова на территории исследования с использованием международных ландшафтных индексов фрагментации.

Представленная методика с использованием международных критериев оценки фрагментации растительного покрова и результаты исследования могут быть использованы в системе мониторинга и контроля устойчивости лесного покрова республики Каракалпакстан к негативным природным и антропогенным воздействиям.

Кроме того, полученные картографические данные могут послужить вспомогательным материалом для создания геоинформационной базы данных растительного покрова Каракалпакстана с возможностью учета полученной информации при принятии плановых решений в области проектирования и ведения лесохозяйственной деятельности на территории республики.

Ниже рассмотрен ряд методик и подходов, по оценке фрагментации лесного покрова.

Так ученые Университета Северной Британской Колумбии, (Канада), провели оценку изменения и фрагментации лесного покрова на северо-востоке Британской Колумбии. Потеря и фрагментация лесного покрова увеличились в последние годы из-за увеличения антропогенного землепользования. В то время как предыдущие исследования в основном были сосредоточены на изменении лесного покрова в результате других нарушений. Оценка была проведена с использованием методов классификации изображений Landsat 1985, 2000 и 2015 годов с использованием алгоритма «RandomForests» (Случайный лес). Авторы обнаружили, что период с меньшей степенью фрагментации имеет меньшую степень потери хвойного лесного покрова и наоборот. Авторы отмечают, что хвойный лесной покров с большей вероятностью восстановится на бесплодной земле. Кроме того, они пришли к выводу, что скорость восстановления лесов из антропогенно-индуцированных категорий земель, вероятно, объясняет степень фрагментации леса (Appiah, 2017). Сотрудники агентства по охране окружающей среды США Северной Королины, сравнили показатели фрагментации леса, полученные на основе данных высокого разрешения (2 м), с теми же показателями, полученными на основе широко используемых (30 м) данных на основе Landsat. Они применили масштабирование плотности площади к бинарным картам (лес; нелес) для обоих источников, с целью получения данных по лесам: преобладающего (плотность  $\geq 60\%$ ), внутреннего ( $\geq 90\%$ ) и нетронутого (100%) леса. В целом, данные снимков с высоким разрешением обнаружили больше леса, который был более четко распределен даже в больших пространственных масштабах. Ожидается, что улучшения в пространственном разрешении продуктов дистанционного зондирования

земного покрова будут способствовать развитию ландшафтной экологии за счет повторной интерпретации закономерностей и масштабирования, стимулирования новых измерений ландшафтных закономерностей и проверки новых гипотез о пространственных закономерностях и экологических процессах (Wickham, 2019).

Научная группа Школы географии и экотуризма (SGE) и Юго-Западный университет лесного хозяйства (SWFU), Куньмин (Китай) провели оценку фрагментации леса на уровне небольших площадей с использованием анализа морфологических пространственных моделей в Цюйцзине, провинция Юньнань. В этом исследовании пространственная форма лесного ландшафта и режимы фрагментации леса городов были изучены в городе Цюйцзин, провинция Юньнань, Китай, за 2006 и 2016 годы, в значительной степени опираясь на анализ морфологических пространственных моделей (MSPA) и алгоритм кластеризации «К-средних». Результаты 2016 г. показали, что морфологию лесного ландшафта провинции Цюйцзин можно разделить на семь классов: сердцевина, перфорация, островок, мост, опушка, ветвь и кольцо (площади в процентном соотношении составили: 41,94%, 1,22%, 7,04%, 11,12%, 23,26%, 11,74% и 3,68%) и сравнить с ландшафтными площадями этих же характеристик в 2006 году (т.е. распределение по площади в 2006 г. составило: 1,71%, -0,02%, 0,30%, -1,65%, -0,20 %, -0,19% и 0,05%, соответственно). Авторы отмечают, что расширение земель под застройку и сельскохозяйственных угодий усиливает фрагментацию лесов; однако рукотворная планомерная экологическая реставрация может значительно улучшить лесной покров и улучшить пространственную форму городского лесного ландшафта (Хяо-уан, 2021). Учеными Университетской школы экологического менеджмента, Университета Гуру Гобинд Сингха Индрапрастхи, Дварка, Нью-Дели, Индия, была проведена оценка землепользования, растительного покрова и фрагментации лесов в традиционном ландшафте в Манипуре, Северо-Восточная Индия. Используя геопространственные технологии, они оценили пространственно-временные изменения LULC, чистую скорость обезлесения и фрагментацию леса в традиционном ландшафте Манипура, Северо-Восточная Индия, с 1999 по 2019 год. Разновременные спутниковые данные Landsat 5 Thematic Mapper и Landsat 8 Operational Land Imager использовались для классификации различных классов LULC. Инструмент фрагментации ландшафта LFT v2.0 использовался для классификации различных категорий фрагментации леса. В период обучения, было установлено,



данные полевых исследований, тематические карты ресурса Dynamic World V1, готовые спутниковые данные Sentinel-2 на ГИС-интернет платформе Google Earth Engine, интернет ресурсы Google Map и Yandex Map.

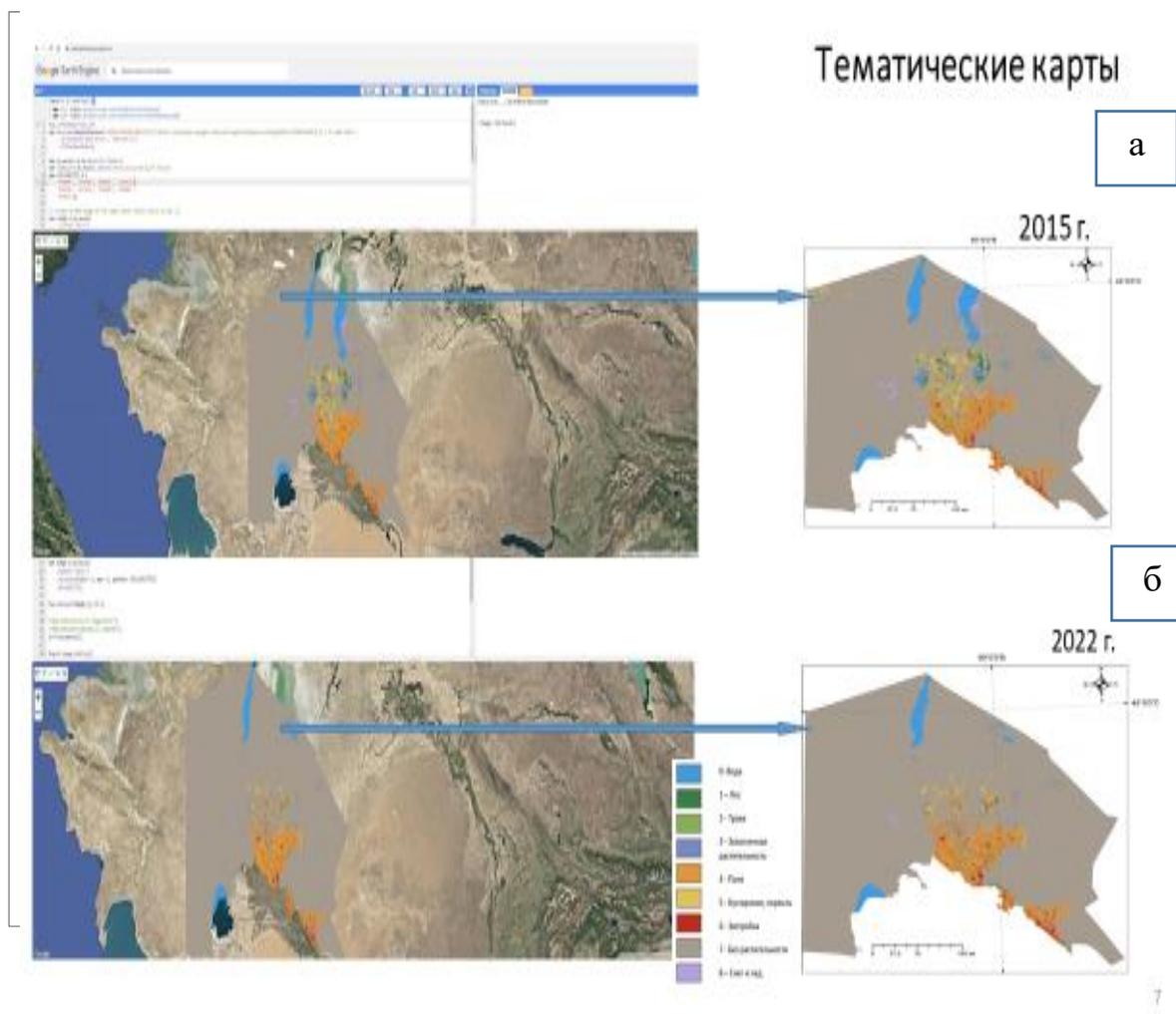
Для согласования тематических карт по данным ГИС Dynamic Word1 и данных ДЗЗ, были проведены полевые исследования в рамках преддипломной практики. Во время проведения полевых работ оценивались тестовые участки на лесных землях в пределах границ территории исследования. В первую очередь определялся породный состав насаждений и далее определялись таксационные показатели древостоев. Затем проводился сравнительный анализ структуры объектов наземного покрова с данными ДЗЗ высокого разрешения. Всего было сформировано 16 тестовых участков (Рис. 2.).



**Рис. 2.** Набор тестовых участков (векторный слой), б) ТУ№5 Тугайный лес (район течения р. Амударья) координаты (42.772207, 59.307250)

### **Порядок оценки фрагментации лесных экосистем Каракалпакстана Получение тематических карт.**

Для получения картографического материала по пространственному распределению лесного покрова на территории республики и ввиду не полной первичной информации об объекте исследований (данные лесо инвентаризации и данные полевых исследований) были использованы готовые продукты в виде тематических карт электронного ресурса Dynamic Word1 (Рис 3.).



**Рис. 3. Электронный ресурс «Dynamic Word1»**

В результате, исходными данными для оценки фрагментации послужили тематические карты Dynamic Word1 с последующей загрузкой и обработкой этих карт на электронной ГИС платформе – «Google Earth Engine», позволяющей обрабатывать крупные мозаики спутниковых (растровых и векторных данных).

Продукты в виде тематических карт 2015 и 2022 гг., отграниченные границами Республики Каракалпакстан, были получены на основе данных Sentinel-2, с ресурса Dynamic Word1 и визуализированы для последующей обработки и оценке в «Google Earth Engine» (Рис. 4.)

**Рис. 4. Загрузка тематических карт по границам республики Каракалпакстан на электронную платформу Google earth engine а) 2015 г., б) 2022 г**

Проведенный экспертный анализ позволил провести выборку основных классов по их тематической направленности. В результате, переклассификации классов в «Google Earth Engine», исходные классы анализируемых тематических карт 2015 и 2022 гг., представляющие объекты, включающие древесно-кустарниковую растительность (Лес, затопленная растительность и кустарники) были объединены в один класс (древесная растительность) в проекте, представленный как - «Лесная растительность». Все остальные классы были объединены в другой общий класс. т.е. получены бинарные карты «Лес» и «Не лес» (Рис. 5.)

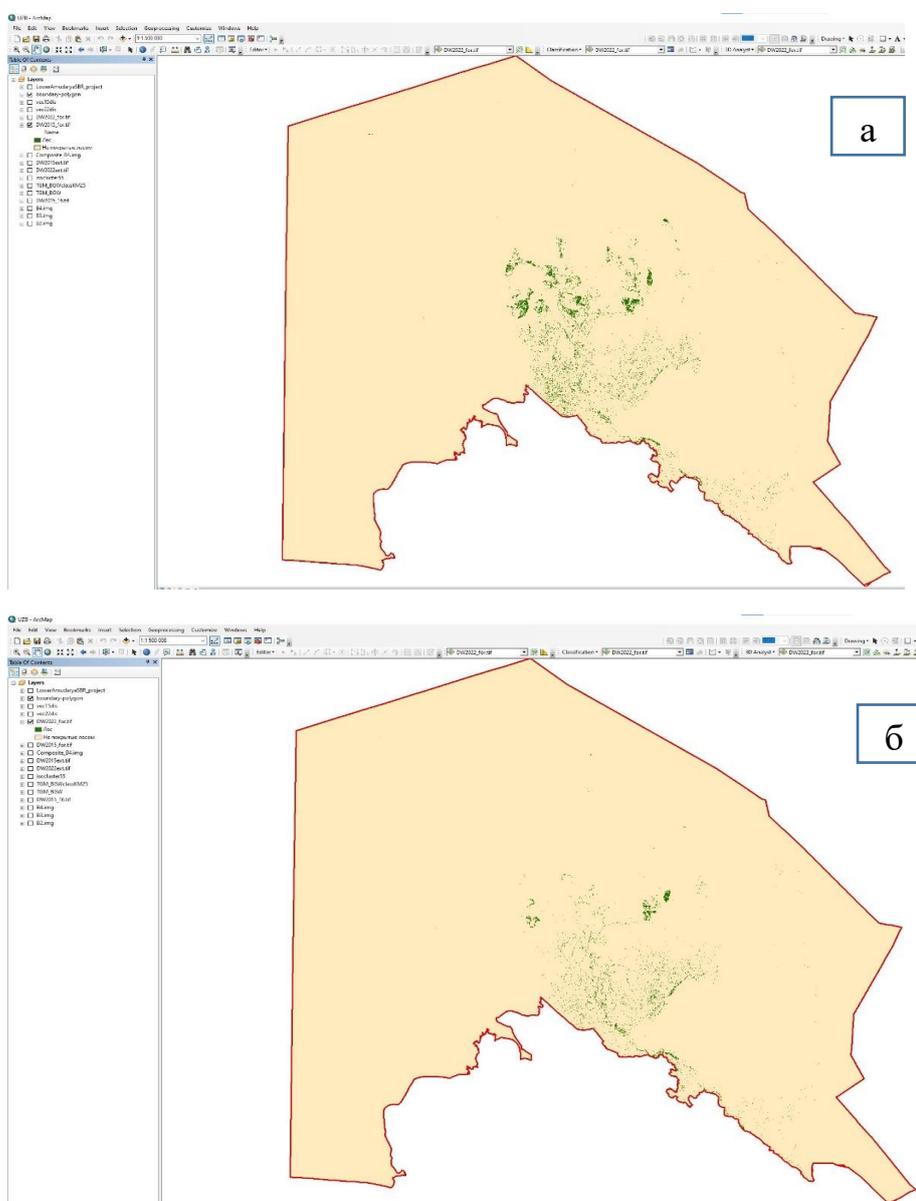
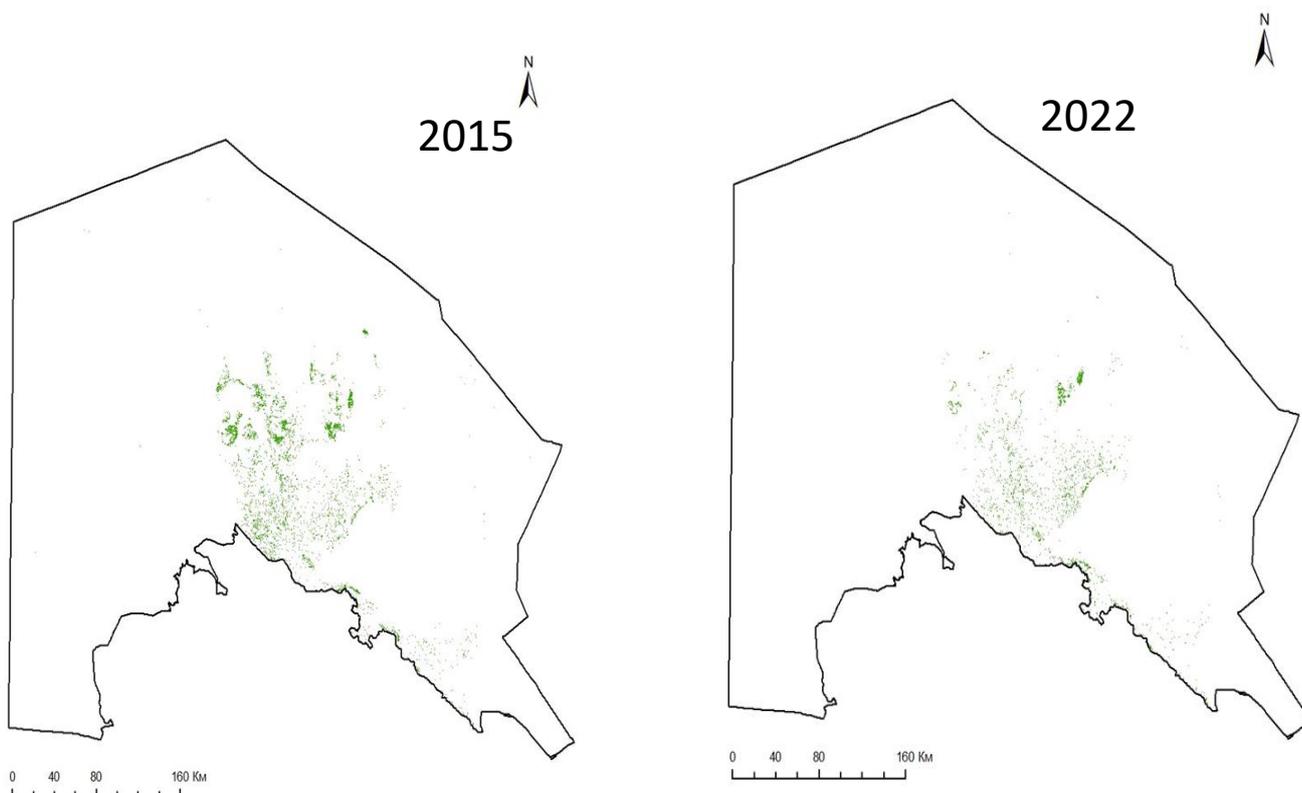


Рис. 5. Бинарные карты 2015 и 2022 гг. по классам: а) «Лес», б) «Не лес»

Шаг 3. Из бинарных карт, для оценки, были выделены только векторные слои «Лес» и «Не лес» с проведением процедуры генерализации в среде ГИС ArcGisi удалением участков леса менее 0,3 га (Рис. 6.)



*Рис. 6. Векторный слой «Лес» (зеленый цвет) а). 2015 г., б). 2022 г.*

Таким образом для оценки динамики фрагментации были подготовлены два векторных слоя «Лесная растительность» за 2015 и 2022 гг.

Для оценки степени фрагментации лесного покрова в работе использовались ландшафтные индексов (табл. 2) (McGarigal, Marks, 1995). Оценка проводилась с использованием программы FRAGSTATS, версия 4.2 (Рис. 7). Индексы определялись в растровом формате для каждой карты за 2015 и 2022 гг. Fragstats вычисляет широкий спектр ландшафтных индексов для категориальных шаблонов карт, (Таб. 1.)

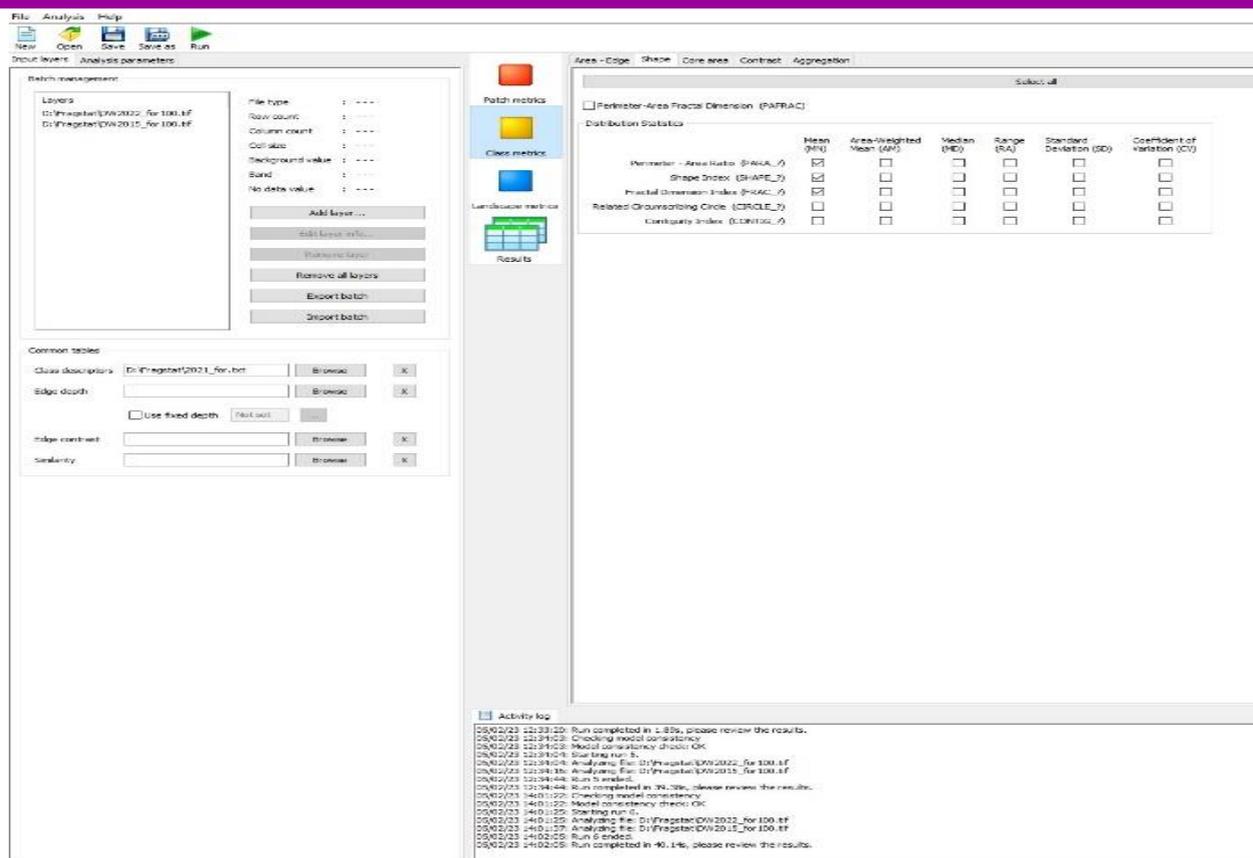


Рис. 7. Интерфейс программы FRAGSTAT

Таблица 1. Международные индексы оценки фрагментации лесных территории

Индекс	Уравнение	Интервал оценки	Описание
Процент лесистости (англ. Percentage of landscape, PLAND), %	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100$	$0 < PLAND < 100$	Процент лесистости определяется отношением покрытой лесом площади (англ. Forest area, FA) к общей площади исследуемого района (англ. Total area, A)
Количество групп лесных участков (англ. Number of patches, NP), шт.	$NP = n$	$NP > 1$	Число лесных участков в исследовании. Чем их больше, тем леса считаются более фрагментированными
Плотность лесных участков (англ. Patch density, PD), шт/100 га	$PD = \frac{n_i}{A} \times 10000 \times 100$	$PD > 0$	Количество лесных участков на 100 га
Относительная длина лесных участков (англ. Edge density, ED), м/га	$ED = \frac{\sum_{k=1}^n e_{ik}}{A} \times 10000$	$ED \geq 0$	Общая длина границ лесных участков с поправкой на долю от общей площади лесов
Средний размер лесного участка (англ. Mean patch size, AREA_MN), м <sup>2</sup>	$AREA\_MN = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \times 10000^{-1}}{n_i}$	$AREA\_MN > 0$	Среднее арифметическое площадей лесных участков: $a$ — площадь лесного участка; $n_i$ — количество лесных участков
Индекс формы (англ. Mean shape index, SHAPE_MN), безразмерный	$SHAPE = \frac{0,25 p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}}$	$SHAPE\_MN > 1$	SHAPE_MN равняется среднему индексу формы по всем участкам ландшафта ( $p_{ij}$ — периметр лесного участка, $a_{ij}$ — площадь лесного участка (в м <sup>2</sup> ))
Расстояние до ближайшего соседнего участка (англ. Euclidean nearest neighbor distance, ENN_MN), м	$ENN\_MN = \frac{\sum_{j=1}^n h_{ij}}{n_i}$	$ENN\_MN > 0$	ENN_MN равно среднему расстоянию между всеми фрагментами ландшафта $h_{ij}$ на основе кратчайшего расстояния между центрами участков. ENN_MN приближается к 0 по мере уменьшения расстояния до ближайшего соседнего участка
Фрактальный индекс (англ. Fractal index distribution, FRAC), безразмерный	$FRAC = \frac{2 \ln(0,25 p_{ij})}{\ln a_{ij}}$	$1 < FRAC \leq 2$	В формуле $p_{ij}$ — периметр лесного участка; $a_{ij}$ — площадь лесного участка (в м <sup>2</sup> ). Фрактальный индекс приближается к 1 для форм участков с простыми периметрами и близок к 2 для сложных форм

Для оценки фрагментации в программе FRAGSTAT, полученные векторные слои «Лес» 1992 и 2022 гг. были переведены в растровый формат.



Фрагментированность лесного покрова происходит в том случае, если происходят следующие изменения ландшафтных индексов: увеличение количества лесных участков (NP), увеличение плотности участков (PD) и также уменьшение их среднего размера (AREA\_MN). Если наблюдается обратный порядок динамики, то это говорит о процессе слияния лесных ландшафтов.

Для более полного понимания картины динамики фрагментации лесного покрова также проводится оценка индекса относительной длины лесных участков (ED), который непосредственно связан с вышеперечисленными показателями (Воробьев. О.Н, 2022).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Количественный анализ полученных результатов по индексным показателям позволил оценить тенденции в динамике фрагментации лесного покрова Каракалпакии (Табл. 2).

Таблица 2. Значения динамики ландшафтных индексов лесного покрова Каракалпакии

№	Индексы	Год		Динами фрагментации в целом за (2015-2022)	
		2015	2022		(2015-2022) результат фрагментации
1	Процент лесистости (PLAND)	1,0199	0,5036	↓	Значение уменьшилось, F* -увеличивается
2	Количество групп лесных участков (NP)	21278, шт.	16564	↓	Значение уменьшилось, F-увеличивается
3	Плотность лесных участков (PD)	0,1282	0,0998	↓	Значение уменьшилось, F-увеличивается
4	Относительная длина лесных участков (ED)	27451200	16471000	↓	Значение уменьшилось, F-увеличивается
5	Средний размер лесных участков (AREA_MN)	7,955, га	5,0455	↓	значение уменьшилось, F-увеличилось
6	Индекс формы (SHAPE)	1,1814	1,1392	↓	Значение уменьшилось, F-увеличивается
7	Среднее расстояние между центрами лесных участков (ENN_MN)	412,4 м	373,1	↓	Значение уменьшилось, F-увеличивается
8	Фрактальный индекс (FRAC)	1,02	1,02		Без изменений, F-без изменений

\*F-фрагментация

Процент лесистости PLAND за первый исследуемый период (2015–2022) уменьшился более чем в половину на 0,5%. Стоит отметить крайнюю неравномерность распределения лесных площадей на территории исследования. Максимум таких участков находится в центральной части Каракалпакии. Лесные территории, в основном, сосредоточены в границах ООПТ, таких как Бадайтугай, Южный Устюрт, Белтов, Окпетки, Междуречье Акдарья-Казакдарья.

По результатам исследования выявлено, что с 2015 по 2022 гг. количество лесных участков (NP) уменьшилось с 21278 до 16564. В первую очередь это связано с существенным ухудшением ситуации по осадкам. Нехватка влаги приводит к усыханию растительного покрова на больших площадях. Как следствие уменьшилась и плотность лесных участков (PD) с 0,12 единиц в 2015 до 0,09 в 2022 г. Оценка средней площади лесных участков (AREA\_MN) также выступает одним из индексов, по которому количественно определяют фрагментированность лесных ландшафтов. С 2015 г. средняя площадь лесных участков уменьшилась на 7,9 га до 5,04 га, а также уменьшился показатель индекса формы (см. табл. 3). Это свидетельствует о существенном увеличении раздельности участков леса за оцениваемый период, что можно объяснить, климатическими факторами и увеличением антропогенной нагрузки (увеличение земель сельхозугодий и вырубка топливной древесины). Отрицательная динамика относительной длины границ лесных участков (ED), с 27451200 м в 2015 г. до 16471000 м в 2022 г. является следствием всех вышеперечисленных тенденций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведена оценка динамики и степени фрагментации лесного покрова на территории Каракалпакистана за период с 2015 по 2022 г., лесистость территории которой представлена неравномерно. Анализ фрагментации лесного покрова за прошедшие 7 лет позволил проследить процесс пространственного распределения лесов Каракалпакистана. Лесной ландшафт территории можно охарактеризовать как умеренно фрагментированный с тенденцией к агрегированию (объединению) лесных участков, иначе говоря, к снижению фрагментации.

По результатам исследования выявлено, что с 2015 по 2022 фрагментированность лесных земель на территории Каракалпакии существенно увеличилась, что существенно уменьшает уровень устойчивости лесных экосистем к

внешним воздействиям. Причинами данной ситуации является как природные так и антропогенные факторы: ухудшение климатических условий (рост температуры, сокращение осадков, увеличение воздействия суховейв), общий дефицит водных ресурсов, увеличение процесса урбанизации, существенное развитие транспортной инфраструктуры, увеличение рубки леса в зимний период в дальних поселках и населенных пунктах, деградации почв.

## РЕКОМЕНДАЦИИ

В дальнейшем, во избежание увеличения фрагментации лесного покрова на территории исследования Республики Каракалпакстан, возможно применение следующих мер:

- разработка и осуществление мероприятий по предотвращению деградации лесов;
- усиление мер по защитному лесоразведению в республике,
- создание противоэрозионных насаждений на горных склонах, в оврагах и на бросовых землях;
- предотвращение песчаных заносов и их закреплению, путем осуществления мероприятий по высаживанию деревьев и кустарников против опустынивания;
- улучшить состояние озелененных территорий, включая лесопосадки, выполняющих функции по регулированию климата, санитарно-гигиенические, оздоровительные и иные защитные функции;
- разработка проектов по созданию защитных лесных насаждений на территории сельскохозяйственных предприятий;
- применение современных методов мониторинга растительного (лесного) покрова на основе использование разнообразных спутниковых данных.

## REFERENCES

1. A.DeviR., ShimrahT. Assessment of land use and land cover and forest fragmentation in traditional landscape in Manipur, Northeast India / *International Journal of Environmental Science and Technology*. - 2021. – p. 10291-10306; <https://link.springer.com/article/10.1007/s13762-021-03712-5>
2. KayirangaA., KurbanA. Monitoring Forest Cover Change and Fragmentation Using Remote Sensing and Landscape Metrics in Nyungwe-Kibira Park / *Journal of Geoscience and Environment Protection*. – 2016. – vol. - № - 11. – P. 1-18; [10.4236/gep.2016.411003](https://doi.org/10.4236/gep.2016.411003).



3. AdamsB., J Pontius, GalfordG., Gudex-CrossD. Simulating forest cover change in the northeastern U.S. decreasing forest area and increasing fragmentation// *Landscape Ecol.* – 2019. – P. – 2401-2419; <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-019-00896-7>
4. AdilovB., Shomurodov H, LianlianF. Transformation of vegetative cover on the Ustyurt Plateau of Central Asia as a consequence of the Aral Sea shrinkage / *Journal of Arid Land.* – 2021. - P. - 71–87; <https://link.springer.com/article/10.1007/s40333-020-0077-7>
5. BeraB., SahaS., BhattacharjeeS. Estimation of Forest Canopy Cover and Forest Fragmentation Mapping Using Landsat Satellite Data of Silabati River Basin (India)// *Journal of Cartography and Geographic Information.* - 2020. – P. – 181-197; <https://doi.org/10.1007/s42489-020-00060-1>
6. AdamsB., PontiusJ. Simulating forest cover change in the northeastern U.S. decreasing forest area and increasing fragmentation// *Landscape Ecol.* – 2019. – P. - 2401-2419; <https://link.springer.com/article/10.1007/s10980-019-00896-7>
7. ReddyC. S., PashaS. V. Quantifying nationwide land cover and historical changes in forests of Nepal (1930–2014): implications on forest fragmentation// *Biodivers Conserv.* - 2018. - №27. – P. – 91-107; <https://link.springer.com/article/10.1007/s10531-017-1423-8>
8. SungC., ParkC., KimJ. Politics of forest fragmentation: a multiscale analysis on the change in the structure of forest landscape in the North and South Korean border region/ *Regional Environmental Change.* - 2018. – P. – 197-147; <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1394-7>