

УДК 504.062.2; 504.062.4

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРАТЕГИЙ РЕАБИЛИТАЦИИ  
ПО БОРЬБЕ С ОПУСТЫНИВАНИЕМ ПРИ ПОМОЩИ ДАННЫХ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

© 2025 г. А. Мебарки, Т. Ситайеб

Университет Сайды и.м. Мулат Тахара

Алжир, 20000, г. Сайда, Ситэ Эннаср, п/я 138

E-mail: [abderrahmane.mebarki@univ-saida.dz](mailto:abderrahmane.mebarki@univ-saida.dz), [tayeb.sitayeb@univ-saida.dz](mailto:tayeb.sitayeb@univ-saida.dz)

Поступила в редакцию 23.10.2024. После доработки 10.11.2024. Принята к публикации 14.11.2024.

За годы в провинции Наама, Алжир было запущено множество проектов, направленных на восстановление территорий и борьбу с опустыниванием. Данное исследование сосредоточено в северном регионе, расположенном между муниципалитетами Эль Биод и Мекерия и разделено на 3 ключевых участка: А, В и С. Для мониторинга эволюции растительного покрова и деградации, вызванной вышеупомянутыми проектами, был использован преобразованный индекс растительности с коррекцией по почве (TSAVI). Для построения карты опустынивания и уровня засухи был применен нечеткий логический анализ, с использованием индекса TSAVI, индекса песчаной завесы (англ. «sandy veil index» или SVI) и данных по температуре поверхности почвы за 5 лет (1984, 1994, 2000, 2013, 2023 гг.). Результаты исследования показали, что данные проекты были успешны в разной степени: некоторые достигли поставленных целей, а некоторые привели к деградации.

На их реализацию повлияли следующие факторы: основной – изменение климата; высокие температуры и низкий уровень осадков нанесли взаимосвязанный ущерб; перевыпас скота повлиял на проект, касавшийся пастбищных насаждений и достигший определенных успехов, несмотря на деградацию; расширение городов негативно повлияло на проект по высадке зеленых поясов из-за вырубki деревьев. Выбор растений, а именно, сосны алеппской (*Pinus halepensis*) и эвкалипта камальдульского (*Eucalyptus camaldulensis*), для проектов по восстановлению (высадка зеленых поясов, массовое облесение) показал отсутствие регенерации данных видов и их последующую деградацию в связи с их несовместимостью с суровыми климатическими условиями региона. И, напротив, проект по укреплению песчаных дюн продемонстрировал значительное и многолетнее развитие растительности, что объясняется использованием таких видов, как тамарикс безлистный (*Tamarix articulata*) и ретама обыкновенной (*Retama raetam*), известных своей устойчивостью к климату данного района. Они оказались крайне полезны для стабилизации песка и защиты территории.

*Ключевые слова:* провинция Наама, преобразованный индекс растительности с коррекцией по почве (TSAVI), нечеткий логический анализ, картографирование, восстановление, опустынивание.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2025-1-12-29**

**EDN: RKIUZG**

Провинция (араб. «вилайет») Наама, будучи степным вилайетом, подвержена опустыниванию, которое продолжает усиливаться под воздействием ряда природных и антропогенных факторов. В условиях, позволяющих людям получать выгоду и не брать на себя ответственность за ухудшение ситуации, опустынивание означает деградацию земель в аридных, полуаридных и сухих субгумидных районах под воздействием различных факторов, включая как климатические, так и деятельность человека. Деградация в аридных районах проявляется в ухудшении растительного покрова, почвы и водных ресурсов, что приводит к сокращению или полному уничтожению биологического потенциала земель или их способности поддерживать живущее на них население (UNCCD ..., 1994). В Алжире около 500 тыс. га степных земель претерпевают опустынивание, а более 7 млн. га находятся под прямой угрозой от него (MATE ..., 2002).

Исходя из своего опыта, лесоводы вынуждены искать наиболее подходящие решения для данной проблемы. Защита земель с помощью восстановления леса отражает масштабы опустынивания, последствия которого в ближайшем будущем и в долгосрочной перспективе проявятся на экологическом, экономическом и социальном уровнях (Zair, 2011). Борьба с опустыниванием стала главной задачей местных властей и лесоводов. Укрепление песчаных дюн и создание зеленого пояса – это лишь одни из проектов лесного ведомства.

*Закрепление песчаных дюн.* С 1985 года начались первые мероприятия по сохранению лесов через закрепление дюн. Площадь закрепленных дюн увеличивалась из года в год благодаря высадке таких растений, как тамарикс безлистный (*Tamarix articulata* Vahl) и ретамы обыкновенной (*Retama raetam* (Forssk.) Webb & Berthel.) – основных видов, используемых для закрепления дюн по всей провинции. J. Greco (1966) утверждал, что это самое простое решение для континентальных дюн, а размножение данных видов черенкованием не требует больших затрат. С 2003 года правительство начало внедрять применение механического способа – трельяж из сухих пальм. Закрепление проводится в дюнных районах и направлено на стабилизацию ветровых наносов, которые угрожают городам, инфраструктурам и технике.

*Проект «зеленый пояс»* занимается высадкой насаждений вокруг городов для восстановления городских территорий и улучшения почв вокруг них. Основные зеленые пояса были созданы в Эль-Биоде, Нааме, Мешерии, Айн-Сефре и Айн-Бен-Хелиле, с плотностью 2500 растений на 1 га. В основном для них используется сосна алеппская (*Pinus halepensis* Mill.), изредка – в сочетании с другими растениями, например, кипарисом. Эти пригородные насаждения, которые раньше росли на достаточном удалении от городов, теперь произрастают в непосредственной близости от зданий, являясь желанной частью процесса урбанизации.

Степная экосистема провинция Наама особенно хрупка и подвержена деградации из-за экологических ограничений и интенсивного антропогенного давления (Sitayeb, 2016; Khalid et al., 2015; Aidoud, Touffet, 1996). Работы по восстановлению леса затронули голые (не покрытые лесом) земли провинции. В данном исследовании мы изучили 4 различных типа восстановления, которые используются местными лесничествами: массовое облесение, зеленые пояса, закрепление песчаных дюн, высадка пастбищ. Назначение этих типов насаждений соответствуют лесохозяйственной номенклатуре, принятой Центральным лесным управлением, и при необходимости может быть дополнено или изменено.

Цель данного исследования – отслеживание проектов по восстановлению земель в регионе, развитию растительного покрова, наблюдение за их экологическим воздействием на регион и население, а также за негативным влиянием местного населения на успех таких проектов.

В последние годы для изучения процессов деградации земель и сопутствующих им рисков широко используются дистанционное зондирование и GIS-технологии (Ajaj et al., 2017; Fiorillo et al., 2017; Mbow et al., 2015; Vicente-Serrano et al., 2015). Многие исследования сосредоточены на определенных аспектах деградации, таких как деградация растительности (Curtis et al., 2018), эрозия почвы (Borrelli et al., 2016; Zhang et al., 2009) и опустынивание. Метод нечеткой логики оказался полезен для изучения всех сложностей, неопределенностей и неточностей, присущих процессам деградации (Feng et al., 2017). Он применяется для оценки стабильности растительности (Feng et al., 2017; Lewis et al., 2014) и качества почвы в зависимости от опустынивания и деградации (Turhan et al., 2019), а также рисков проседания почвы (Mohebbi Tafreshi et al., 2021). Этот метод является ценным инструментом в качественной оценке разнообразных состояний земель, хотя наша работа в основном была сфокусирована на отдельных изменениях, которым подвержены территории.

Кроме того, мы применили GIS, чтобы картографировать трансформацию растительного покрова с 1984 по 2023 год, используя преобразованный индекс растительности с коррекцией по почве (TSAVI). Выявление изменений в почвенном покрове остается ключевым методом в планировании и управлении территориями (Sahebjalal, Dashtekian, 2013), расширившись за последние годы за счет технологий GIS и дистанционного зондирования (Maasikamäe et al., 2011).

Выявление изменений в растительном покрове необходимо для оценки требующихся работ по восстановлению территорий, а также для точного определения участков, нуждающихся в дополнительном мониторинге или вмешательстве для предотвращения их дальнейшей деградации (Chen, 2023). Индекс TSAVI, разработанный F. Baret с соавторами (1989), использует такие данные,

как угловые коэффициенты линии почвы, для корректировки индекса растительности. Хотя и обладая некоторой устойчивостью к высокой влажности почвы, индекс TSAVI весьма перспективен для использования в полуаридных регионах, поскольку был специально для них разработан, вследствие чего он может быть неэффективен в районах с густой растительностью (Eastman, 2009).

Также мы разработали новый метод, использующий принцип нечеткой логики. Сам концепт нечеткой логики был придуман профессором Л. Заде (Zadeh, 1965) из Калифорнийского университета в Беркли в 1965 году. Широкого признания нечеткая логика не получила вплоть до тех пор, пока профессор Э.Х. Мамдани (Mamdani, 1974) из Лондонского университета, не применил ее на практике для управления автоматическим паровым двигателем. Мы использовали этот подход для создания карт, иллюстрирующих степень опустынивания и засухи в одном и том же регионе. Нечеткая логика позволяет оценить влияние, которое проекты по восстановлению территорий оказывают на растительный покров, в т.ч. их эффективность в стабилизации почвы, снижении засухи, а также влияние растений, выбранных для восстановления.

### Материалы и методы

*Территория исследования.* Провинция Наама расположена на юге высокогорных равнин Алжира, между 32° 08045" и 34° 22013" с.ш. и 0° 36045" и 0° 46005" з.д. Ее площадь составляет 3 млн. га. Население сосредоточено вдоль дороги Оран–Бехар и составляет 37% от общей площади провинции, что свидетельствует о нерациональном использовании территории. Наама характеризуется большим выбором экосистем и биологическим разнообразием. На севере Наама граничит с провинциями Тлемсен и Сиди-Бель-Аббес, на востоке – с провинцией Эль-Баяд, на юге – с провинцией Бехар, на западе – с алжирско-марокканской границей, протянувшейся на 275 км.

Мы изучили 3 ключевых участка, на каждом из которых реализовали один из проектов по восстановлению: участок А – проект пастбищных насаждений; участок В (в г. Эль-Биод) – проект зеленого пояса вокруг города и проект по укреплению песчаных дюн; участок С (в г. Мешерия) – проект зеленого пояса вокруг города и проект массовой высадки деревьев (рис. 1).

*Наборы данных и предварительная обработка.* На начальном этапе мы получили спутниковые снимки территории исследования с сайта «United States Geological Survey» (USGS, 2024), снятые при помощи спутников Landsat 5, 8 и 9 (сенсоры TM и OLI, collection-2 level-2; табл. 1). Результаты съемок Landsat level-2 записаны в виде масштабированных целых чисел, что позволяет преобразовывать данные из плавающей точки в целое число и тем самым получать изображения с функцией отражаемости поверхности (англ. «surface reflectance») и с коррекцией на атмосферу. К каждому пикселю в диапазоне применяется масштабный коэффициент и смещение, а затем добавляется смещение, чтобы преобразовать цифровые значения (англ. «digital numbers» или DN) в значение отражаемости. ArcGIS 10.8 и QGIS использовались для анализа данных, получения индекса TSAVI, температуры поверхности земли, индекса песчаной завесы (SVI) и функции принадлежности нечеткой логики для дальнейшего построения карт засухи и опустынивания (рис. 2):

$$\text{отражаемость поверхности} \cdot \text{коэффициент масштабирования} + \text{смещение} \quad (1),$$

$$\text{температура поверхности} \cdot \text{коэффициент масштабирования} + \text{смещение} \quad (2).$$

*Преобразованный индекс растительности с коррекцией по почве (TSAVI)* – это индекс, разработанный для растительности, чтобы свести к минимуму влияние яркости почвы путем предположения, что линия почвы имеет угловые коэффициенты (Baret et al., 1989). Как было предложено А.Дж. Ричардсон и С.Л. Виганд (1977), линия представляет собой линейную зависимость между красной (R) и ближней инфракрасной (NIR) отражательной способностью обнаженной почвы. Уравнение для расчета линии почвы было применено к снимкам Landsat за 1984, 1994, 2000, 2013 и 2023 гг. для территории, полностью лишенной растительности (табл. 2).

Уравнение для определения почвенной линии выглядит следующим образом:

$$\text{NIR}_{\text{почвы}} = s \cdot R_{\text{почвы}} + a,$$

$$\text{TSAVI} = (s \cdot (\text{NIR} - s \cdot \text{red} - a)) / (a \cdot \text{NIR} + \text{red} - a \cdot s + X \cdot (1 + s^2)) \quad (3),$$

где первый NIR – это ближний инфракрасный (диапазон 4) на снимках Landsat 5, первый red – красный (диапазон 3) на Landsat 5, второй NIR – ближний инфракрасный (диапазон 5) на Landsat 8-9, второй red – красный (диапазон 4) на Landsat 8-9, s – наклон, a – точка пересечения, X – корректирующий параметр, необходимый для снижения уровня шума почвы и равный 0.8.

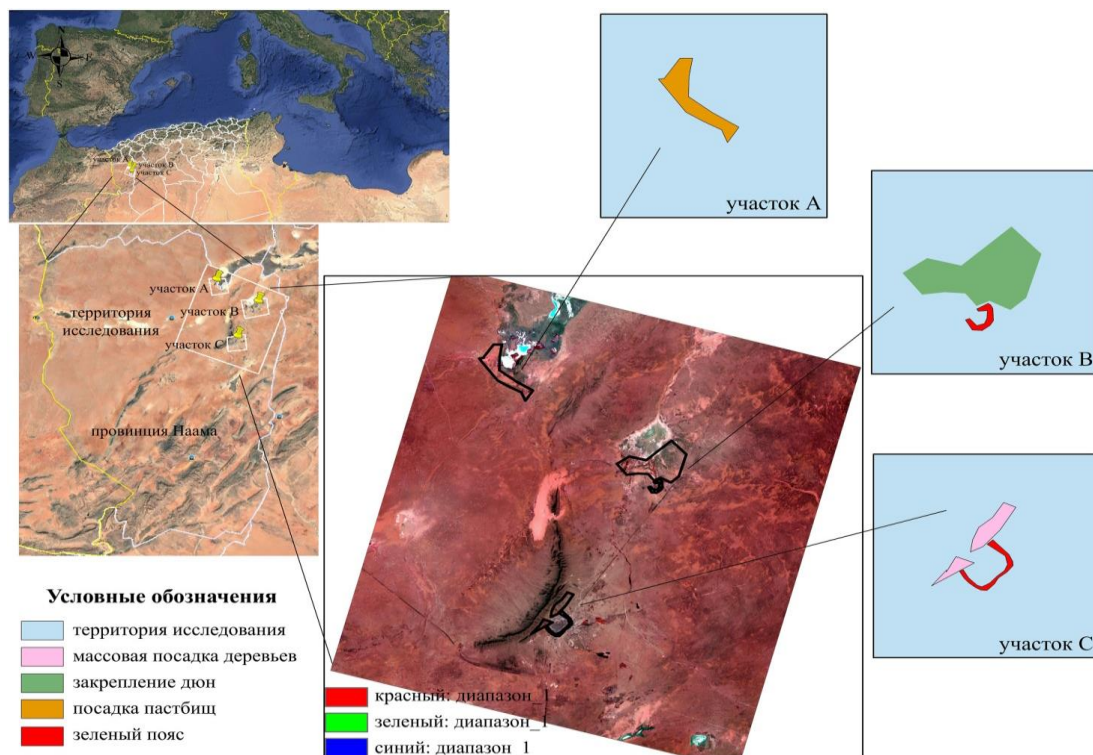


Рис. 1. Расположение территории исследования.

Таблица 1. Параметры спутниковых снимков.

Дата снимка	Landsat	Тип сенсора	Разрешение	Колонка/ряд
05.07.1984	Landsat 5	TM	30 × 30 м	197/037
18.08.1994	Landsat 5	TM		
18.08.2000	Landsat 5	TM		
13.08.2013	Landsat 8	OLI		
10.08.2023	Landsat 9	OLI		

Индекс песчаной завесы (SVI) получают с помощью нижеследующей формулы, которая была разработана А. Abdellaoui и А. Rougab (1997), а затем скорректирована А. Abdellaoui и R. Marmi (2010):

$$SVI = (blue + u \cdot red + v \cdot NIR) / (1 + blue) \quad (4),$$

где NIR – это значения пикселей в ближнем инфракрасном диапазоне, red – значения пикселей в ближнем красном диапазоне, blue – значения пикселей в синем диапазоне,  $u$  и  $v$  – постоянные величины со значениями 1.5 и 2.5 (Abdellaoui, Marmi, 2010).

Температуру поверхности почвы для Landsat level-2 получают, собрав изображения collection-2 level-2 с помощью следующей формулы:

$$(\text{температура поверхности} \cdot \text{коэффициент масштабирования} + \text{смещение}) - 273.14 \quad (5),$$

где температура поверхности – это термальный диапазон, умноженный на коэффициент масштабирования, плюс смещение, необходимое для получения значения в кельвинах; из полученного результата затем вычитается 273.14 для последующего преобразования в градусы Цельсия.

**Классификации.** Метод естественных интервалов Дж.Ф. Дженкса (1967; ESRI ..., 2023; Slocum et al., 2008) – это тип классификации данных, который обычно используется в GIS для оптимального распределения данных по выделенным классам. Он минимизирует дисперсию внутри каждого класса, но максимально увеличивает ее между классами, эффективно выделяя естественные группы и

закономерности. Мы применили этот метод для разделения индексов по классам. Индекс SVI был разделен на 5 классов: 1 – очень высокий, 2 – высокий, 3 – средний, 4 – низкий, 5 – очень низкий. Температура поверхности почвы разделена на такие же 5 классов. Для растительного покрова мы использовали пороговую классификацию (Hashim et al., 2019) – метод для обработки изображений и дистанционного зондирования, который на основе определенных критериев помогает разделять непрерывные данные на дискретные классы. При применении пороговой классификации к TSAVI она помогает выявлять участки с различным состоянием растительного покрова, уровнями деградации и изменения почвенного покрова. На основе экспертных знаний о регионе мы также использовали классификацию стандартного отклонения (в ArcGIS) для разделения растительного покрова на 3 класса: отсутствие покрова, разрозненный покров, густой покров. Отсутствие растительного покрова означает бесплодную почву, процессы урбанизации, наличие дорог, засоление и песок.

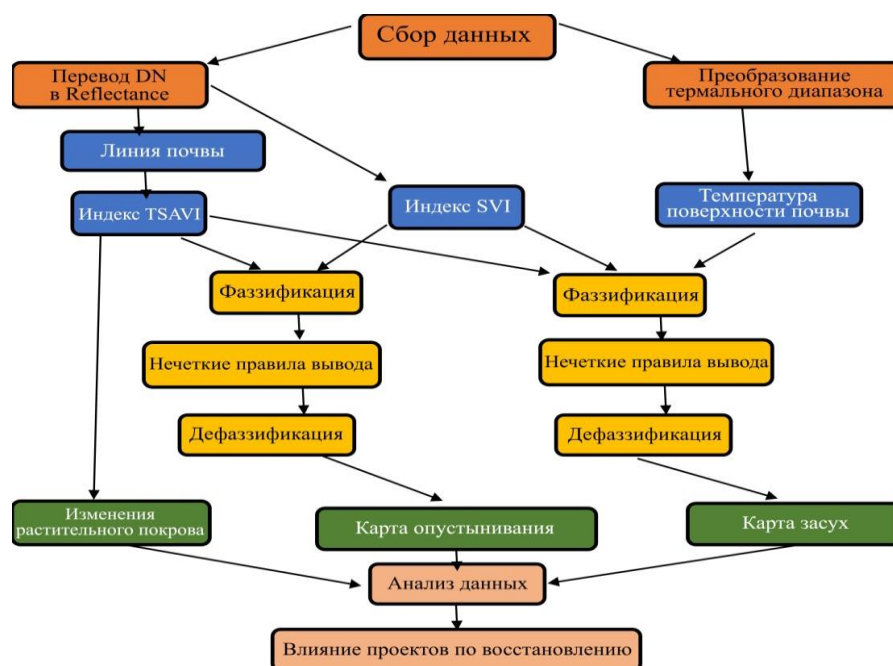


Рис. 2. Методология статьи в виде схемы.

Таблица 2. Коэффициенты линии почвы (коэффициенты линейной регрессии), угловые коэффициенты ( $a$  – точка пересечения,  $s$  – наклон), рассчитанные для 1984, 2000, 2013 и 2023 гг.

Коэффициенты	05.07.1984	18.08.1994	18.08.2000	13.08.2013	10.08.2023
$a$	0.0732	0.0915	0.0065	0.0144	0.918
$s$	1.0455	0.9782	1.1536	1.2631	1.136
$R$	0.9774	0.957	0.9773	0.987	0.9582
$R^2$	0.9555	0.916	0.9553	0.9742	0.9183

*Изменения почвенного покрова.* После применения пороговой классификации мы использовали ArcGIS, чтобы изменить классификацию слоя, а затем преобразовали слой из растрового (англ. «from raster») в векторный и применили инструмент геообработки (англ. «geoprocessing tool»), чтобы объединить слой 1984 года со слоем 1994 года, слой 1994 с 2000, 2000 с 2013 и 2013 с 2023 гг. Для отслеживания изменений почвенного покрова за указанные годы мы выделили 5 показателей: отсутствие изменений в отсутствующем растительном покрове, отсутствие изменений в разрозненном покрове, отсутствие изменений в густом покрове, уменьшение растительного покрова, увеличение растительного покрова.

*Нечеткая логика и введение нечеткости.* Нечеткая логика, разработанная Л. Заде (Zadeh, 1965), – это мощный инструмент для работы с неопределенностями и неточностями. Введение нечеткости или

фаззификация (англ. «fuzzification») означает преобразование значений индексов в нечеткие значения принадлежности с помощью нечеткой функции принадлежности, которая приводит эти значения к единому стандарту в диапазоне от 0 до 1 для дальнейшего анализа. Для расчета нечетких значений принадлежности для каждого класса по всем индексам часто используют Гауссову функцию, т.к. ее колоколообразная кривая очень похожа на нормальное распределение (Ross, 2010; Klir, Yuan, 1995; Kosko, 1992). Гауссова функция особенно эффективна при моделировании неопределенностей и неточностей, отражающих различные природные явления. Перед тем, как применить ее, необходимо рассчитать среднее значение и стандартное отклонение для каждого класса по всем индексам (табл. 3). Полученные статистические параметры используются в Гауссовой функции для того, чтобы определить значения нечеткой принадлежности с помощью калькулятора растра (англ. «raster calculator tool»), который рассчитывает принадлежность каждого класса по всем индексам. В результате каждый класс получает вид разделенного растра с диапазоном от 0 до 1.

$$\mu(x) = \text{Exp}(-((x - m)^2) / (2\sigma^2)) \quad (6),$$

где  $\mu(x)$  – это степень принадлежности  $x$  к нечеткому множеству,  $x$  – входное значение,  $m$  – середина (или центр) Гауссовой кривой,  $\sigma$  – стандартное отклонение, контролирующее ширину колоколообразной кривой,  $\text{Exp}$  – показательная функция.

**Таблица 3.** Минимальные и максимальные изменения температуры поверхности почвы, индексов TSAVI и SVI, а также среднее и стандартное отклонение для каждого класса для температуры, TSAVI и SVI.

t°C 2023	min	max	средн.	стан.	TSAVI 2023	min	max	средн.	стан.	SVI 2023	min	max	средн.	стан.
оч. низ.	34.94	47.14	41.04	6.1	отсутств. растит.	-0.0871	-0.02311	-0.0551	0.031996	оч. низ.	0.48	1.37	0.925	0.445
низ.	47.14	50.03	48.59	1.44	разрзн. растит.	-0.02311	-0.01841	-0.02076	0.002351	низ.	1.37	1.52	1.445	0.075
ср.	50.03	51.8	50.92	0.89	густая растит.	-0.01841	0.243004	0.112299	0.130705	ср.	1.52	1.62	1.57	0.05
выс.	51.8	53.3	52.55	0.75						выс.	1.62	1.72	1.67	0.05
оч. выс.	53.3	58.7	55.99	2.7						оч. выс.	1.72	2.56	2.14	0.42
t°C 2023	min	max	средн.	стан.	TSAVI 2023	min	max	средн.	стан.	SVI 2023	min	max	средн.	стан.
оч. низ.	28.17	41.47	34.82	6.65	отсутств. растит.	-0.28	0.0016	-0.1392	0.1408	оч. низ.	0.056	1.168	0.612	0.556
низ.	41.47	46.65	44.06	2.59	разрзн. растит.	0.0016	0.011	0.0063	0.0047	низ.	1.17	1.34	1.255	0.085
ср.	46.65	49.36	48.005	1.355	густая растит.	0.011	0.271	0.141	0.13	ср.	1.34	1.47	1.405	0.065
выс.	49.36	51.16	50.26	0.9						выс.	1.47	1.64	1.555	0.085
оч. выс.	51.16	56.91	54.035	2.875						оч. выс.	1.64	2.31	1.975	0.335
t°C 2023	min	max	средн.	стан.	TSAVI 2023	min	max	средн.	стан.	SVI 2023	min	max	средн.	стан.
оч. низ.	32.45	40.98	36.715	4.265	отсутств. растит.	-0.044	0.00056	-0.02172	0.02228	оч. низ.	0.6	1.21	0.905	0.305
низ.	40.98	43.5	42.24	1.26	разрзн. растит.	0.00056	0.0044	0.00248	0.00192	низ.	1.21	1.43	1.32	0.11
ср.	43.5	44.66	44.08	0.58	густая растит.	0.0044	0.159	0.0817	0.0773	ср.	1.43	1.54	1.485	0.055
выс.	44.66	45.67	45.165	0.505						выс.	1.54	1.63	1.585	0.045
оч. выс.	45.67	50.86	48.265	2.595						оч. выс.	1.63	2.1	1.865	0.235

## Продолжение таблицы 3.

t°C 2023	min	max	средн.	стан.	TSAVI 2023	min	max	средн.	стан.	SVI 2023	min	max	средн.	стан.
оч. низ.	32.13	43.72	37.925	5.795	отсутств. растит.	-0.042	0.00055	-0.02073	0.021275	оч. низ.	0.4	1.17	0.785	0.385
низ.	43.72	47.12	45.42	1.7	разрозн. растит.	0.00056	0.005	0.00278	0.00222	низ.	1.17	1.38	1.275	0.105
сп.	47.12	48.52	47.82	0.7	густая растит.	0.0051	0.144	0.07455	0.06945	сп.	1.38	1.48	1.43	0.05
выс.	48.52	50.02	49.27	0.75						выс.	1.48	1.61	1.545	0.065
оч. выс.	50.02	57.61	53.815	3.795						оч. выс.	1.61	2.21	1.91	0.3
t°C 2023	min	max	средн.	стан.	TSAVI 2023	min	max	средн.	стан.	SVI 2023	min	max	средн.	стан.
оч. низ.	34.64	44.81	39.725	5.085	отсутств. растит.	-0.033	0.000948	-0.01603	0.016974	оч. низ.	0.63	1.31	0.97	0.34
низ.	44.81	47.8	46.305	1.495	разрозн. растит.	0.00094	0.00455	0.002745	0.001805	низ.	1.31	1.5	1.405	0.095
сп.	47.8	49.17	48.485	0.685	густая растит.	0.0046	0.15	0.0773	0.0727	сп.	1.5	1.62	1.56	0.06
выс.	49.17	50.54	49.855	0.685						выс.	1.62	1.73	1.675	0.055
оч. выс.	50.54	55.22	52.88	2.34						оч. выс.	1.73	2.24	1.985	0.255

*Нечеткие правила вывода* – это фундаментальная концепция нечеткой логики (Mamdani, Assilian, 1975; Zadeh, 1973), основа для принятия решений в нечетких системах. Эти правила используются для описания взаимосвязей между входными переменными и результирующими выходными данными таким образом, чтобы имитировать человеческие рассуждения, которые зачастую неопределенны и неточны. Концепция «if-then» реализована с помощью операций нечетких правил и нечеткого наложения (англ. «fuzzy overlay tool») в ArcGIS 10.8.

*Для карты опустынивания:*

- Правило 1: если индекс SVI очень высокий или индекс TSAVI показывает отсутствие растительного покрова, тогда это экстремальное опустынивание;
- Правило 2: если SVI высокий или TSAVI показывает отсутствие растительного покрова, тогда это сильное опустынивание;
- Правило 3: если SVI средний или TSAVI показывает отсутствие растительного покрова, тогда это среднее опустынивание;
- Правило 4: если SVI слабый и TSAVI показывает разреженный растительный покров, тогда это слабое опустынивание;
- Правило 5: если SVI очень слабый и TSAVI показывает густой растительный покров, тогда опустынивание отсутствует.

*Для карты засухи:*

- Правило 1: если температура поверхности почвы очень высокая или индекс SVI очень высокий или индекс TSAVI показывает отсутствие растительного покрова, тогда это экстремальная засуха;
- Правило 2: если температура высокая, или SVI высокий, или TSAVI показывает отсутствие растительного покрова, тогда это сильная засуха;
- Правило 3: если температура средняя, или SVI средний, или TSAVI показывает отсутствие растительного покрова, тогда это средняя засуха;
- Правило 4: если температура низкая, и SVI низкий, и TSAVI показывает разреженный растительный покров, тогда это слабая засуха;
- Правило 5: если температура очень низкая, и SVI очень низкий, и TSAVI показывает густой

растительный покров, тогда это очень слабая засуха.

*Приведение к четкости или дефаззификация* (англ. «defuzzification») преобразует нечеткие значения принадлежности, полученные в результате нечеткого вывода, в четкие. Мы использовали данный метод, чтобы оценить степень засухи и опустынивания. Для дефаззификации мы применили барицентрический метод или метод центра гравитации (Mamdani, Assilian, 1975), который используется наиболее часто, т.к. он вычисляет центр площади под кривой нечеткого множества. В процессе мы применили взвешенную сумму (англ. «weighted sum tool») в ArcGIS, чтобы интегрировать нечеткие значения принадлежности, соответствующие уровням опустынивания: экстремальное, сильное, умеренное, слабое и отсутствие опустынивания с весовыми значениями 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно. Затем с помощью калькулятора растра мы суммировали нечеткие значения принадлежности для всех уровней опустынивания и уже на основе этого суммарного значения составили карту опустынивания, которая дает четкое и подробное представление о степени опустынивания в регионе. Эту же методологию мы применили при создании карты засухи, используя аналогичные принципы для последовательного и точного отображения степени засухи по всему региону.

$$\text{CoG} = (\sum \mu(x) \cdot W) / \sum \mu(x) \quad (7),$$

где  $(\sum \mu(x) \cdot W)$  – это взвешенная сумма,  $W$  – взвешенное значение общего уровня опустынивания или засухи,  $\mu(x)$  – нечеткое членство общего уровня опустынивания или засухи.

### Результаты и обсуждение

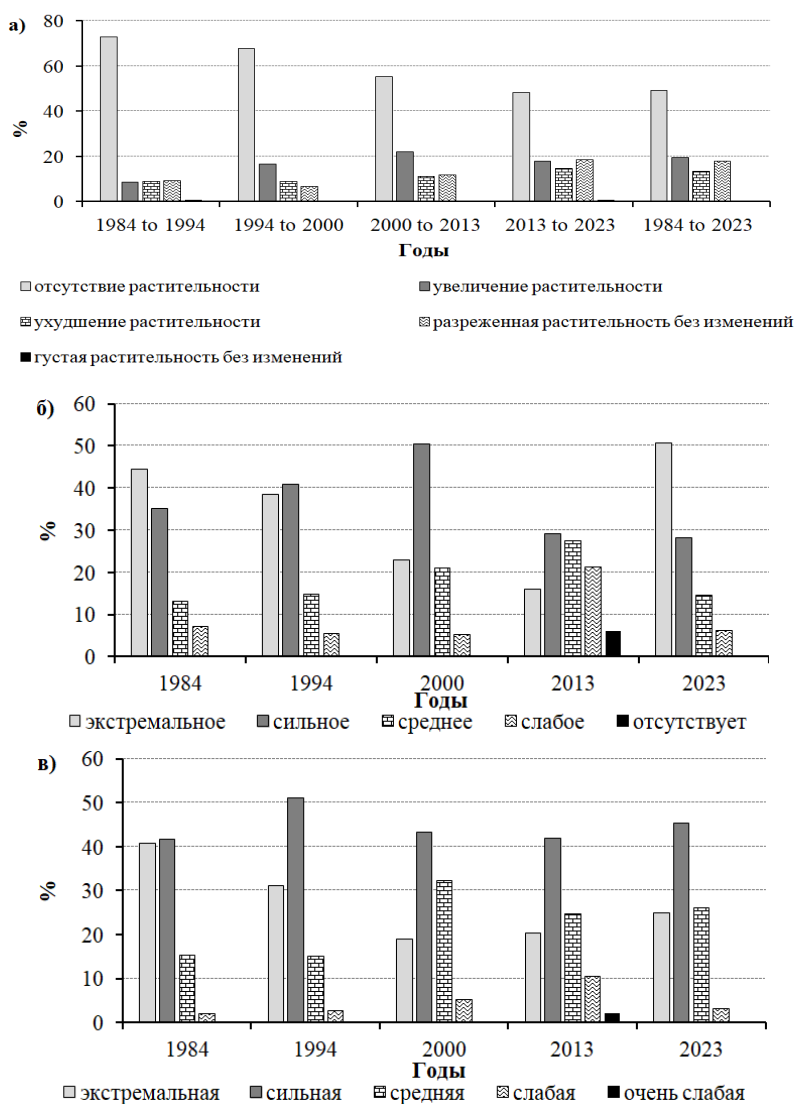
*Анализ карт. Виды индексов TSAVI, SVI и температуры поверхности почвы.* Индекс TSAVI был применен для августа 1984, 1994, 2000, 2013 и 2023 гг. Классификация, проведенная в ArcGIS 10.8 с его помощью, показала, что диапазон составил от  $-0.028$  до  $+0.09$  в августе 1984 года и от  $-0.28$  до  $+0.26$  в августе 2013 года; это самое высокое значение. Для августа 2023 года диапазон составил от  $-0.09$  до  $+0.24$ . Аналогичным образом индекс SVI применялся к одним и тем же месяцам за разные годы. Классификация с его помощью показала, что диапазон составил  $0.63-2.2$  в августе 1984 года и  $0.05-2.2$  в августе 2013 года. Наибольший диапазон наблюдался в августе 2023 года, когда он составил  $0.48-2.6$ . Классификация по температуре поверхности показала, что диапазон температур составил  $34.76-55.13^{\circ}\text{C}$  в августе 1984 года и  $28.19-56.90^{\circ}\text{C}$  в августе 2013 года. Наибольший диапазон был зафиксирован в августе 2023 года, когда он составил  $34.94-58.46^{\circ}\text{C}$  (табл. 3).

*Изменение растительного покрова в периоды 1984-1994, 1994-2000, 2000-2013, 2013-2023 и 1984-2023 гг.* На рисунке 3 показано процентное изменение растительного покрова с течением времени. С 1984 по 1994 год площадь территорий, на которых наблюдалось увеличение растительного покрова, и площадь ухудшившихся территорий составила по 8.7% каждая. С 1994 по 2000 год территории с увеличившимся растительным покровом расширились до 16.44%, а ухудшившиеся территории – до 8.82%. С 2000 по 2013 год территории с увеличившимся покровом достигли 21.83% (самый высокий показатель улучшения), с ухудшившимся – 10.9%. С 2013 по 2023 год территории с увеличившимся покровом составили 17.95%, с ухудшившимся – 14.70%, что представляет собой самый высокий показатель ухудшения за период исследований.

*Степень опустынивания в 1984, 1994, 2000, 2013 и 2023 гг.* На рисунке 3 показаны изменения степени опустынивания с течением времени. В 1984 году экстремальное опустынивание распространилось на 44.37% территории, а сильное – на 35.23%. В 1994 году территории с экстремальным опустыниванием уменьшились до 38.50%, однако сильное опустынивание продолжило распространяться и достигло 40.77%. В 2000 году экстремальное опустынивание снизилось еще больше – до 22.97%, а сильно опустынивание достигло своего максимального значения – 50.57%. В 2013 году оба типа опустынивания достигли минимальных значений – 15.97% и 29.09% соответственно. В том же году наблюдались самые высокие значения для умеренного и слабого опустынивания, а также для территорий, не подверженных данному процессу: 27.54%, 21.35% и 6.03% соответственно. В 2023 году доля территорий с экстремальным опустыниванием заметно увеличилась, особенно в северо-восточном регионе, и составили 50.58%, что является самым высоким значением за этот период; доля территорий с сильным опустыниванием составила около 28.28%.

*Степень засухи в 1984, 1994, 2000, 2013 и 2023 гг.* На рисунке 3 показаны изменения степени

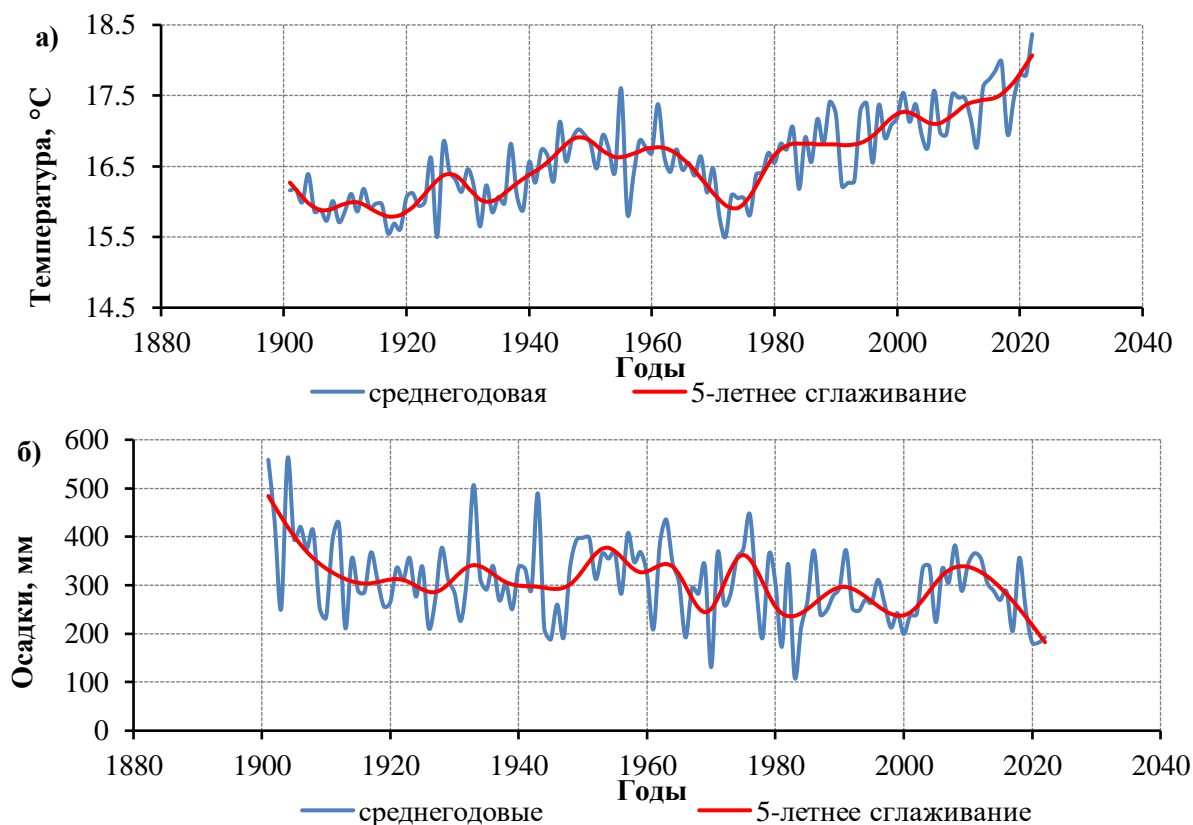
засухи с течением времени. В 1984 году доля составила 40.65%, с сильной – 41.8%. В 1994 году доля территорий с экстремальной засухой уменьшилась до 31.04%, а с сильной – увеличилась до 51.12%. В 2000 году доля территорий с экстремальной засухой уменьшилась до минимального значения – 18.95%, а с сильной – до 43.36%, тогда как доля территорий с умеренной засухой достигла своего максимума – 32.42%. В 2013 году доля территорий с экстремальной засухой снова выросла – до 20.43%, с сильной – снизилась до 41.97%, с низкой и очень низкой – увеличилась до 10.57% и 2.14% соответственно. В 2023 году доля территорий с экстремальной засухой увеличилась до 25.03%, с сильной – до 45.44%, с низкой и очень низкой – уменьшилась до 3.21% и 0.075% соответственно.



**Рис. 3.** Изменение растительного покрова (а), степень опустынивания (б), уровень засухи (в) на территории провинции Наама в период 1984-2023 гг., в %.

*Причины изменения почвенного покрова и влияние проектов по восстановлению. Влияние климатических изменений.* Климат и биофизические явления – это основные факторы трансформации земель, однако и деятельность человека играет значительную роль в изменении наземных экосистем (Steffen et al., 2004). Климат Наамы – пустынный (или BWh по Классификации климатов Кёппена) и характеризующийся долгим, очень жарким летом и короткой теплой зимой. Среднегодовая температура составляет +21.2°C, осадков мало, в среднем – 130 мм/год. Сезон дождей длится с ноября по март, с сильными, но короткими штормами. Лето засушливое, отчего возрастает

скорость испарения (Sekkal et al., 2024). На рисунке 4 проиллюстрировано повышение температуры и снижение осадков с 2013 по 2022 гг. Анализ показывает заметный тренд в изменении температуры поверхности почвы и деградации растительного покрова на территории исследования. Максимальная температура поверхности составила 58.45°C, что является самым высоким значением за все годы исследования (табл. 3). Это повышение коррелирует с самым высоким процентом деградации растительного покрова, который наблюдался в 2013-2023 гг. и составил 14.70% (рис. 3). Следовательно, деградация растительности способствовало значительному росту опустынивания, причем в тот же период экстремальное опустынивание распространилось на 50.58% территории (рис. 3).



**Рис. 4.** Среднегодовая температура (а) и осадки (б) в провинции Наама в 1901-2022 гг.

*Влияние перевыпаса.* Деградация проекта по высадке пастбищ (рис. 5) на ключевом участке А в период 2013-2023 гг. объясняется перевыпасом скота как результат климатических изменений. Около 64% местного населения зависит от животноводства, поэтому перевыпас представляет собой значительную угрозу для проектов по восстановлению пастбищ и провоцирует опустынивание. Так, 6297 животноводов в общей сложности занимаются стадом в 945736 голов (HCDS ..., 2014), что неизбежно ведет к перевыпасу. Более того, стада мешают полноценному отдыху кормовой растительности и препятствуют ее биологическому восстановлению. Перевыпас общепризнанно считается фактором, который оказывает большую нагрузку на природную среду и вызывает опустынивание, особенно в районах, где морфология, климат, растительность и почва не подходят для такого интенсивного сельскохозяйственного использования (Brunner et al., 2008).

*Влияние увеличения городов и населения.* Многие годы ученые утверждали, что расширение городов и пригородная застройка оказывают негативное воздействие на среду, вызывая ее фрагментацию, загрязняя воду и воздух, увеличивая расходы на инфраструктуру, провоцируя социальное неравенство (Squires, 2002; Ewing, 1997). Расширение городов считается фактором, который способен полностью разрушить некоторые объекты восстановления природы, как, например, на ключевом участке С в период 1984-2023 гг. (рис. 5). Расширение жилых районов закономерно вызвано ростом населения, заметно увеличившимся за последние 50 лет. Если в 1987 году местное население составляло 113700 человек, то в 2014 году оно достигло 253934 человека (HCDS ...,

2014). На рисунке 6 показано многолетнее увеличение городской территории, при этом в 1984 году она увеличилась почти в 5 раз. Городская площадь составила 3.30 км<sup>2</sup> в 1984 г., 5.41 км<sup>2</sup> в 1994 г., 6.80 км<sup>2</sup> в 2000 г., 13.92 км<sup>2</sup> в 2013 г., 20.32 км<sup>2</sup> в 2023 г. Процесс увеличения урбанистических территорий значительно повлиял на проект «зеленого пояса» и массовую высадку деревьев на ключевом участке С, а также привело к потере жизненно важных зеленых зон и ускорило сокращение растительного покрова, в первую очередь – из-за масштабных вырубок.

*Влияние видов растений, использованных в проектах по восстановлению региона.* В разных проектах предпочтение отдавалось разным растениям (табл. 4); некоторые из них оказали явное положительное влияние, но некоторые привели к неудачному результату. В проекте по созданию пастбищ на ключевом участке А использовали лебеду сереющую (*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.) и добились некоторого успеха, несмотря на последующее ухудшение пастбищ из-за перевыпаса (рис. 5). По данным М. Вайджи с соавторами (2002) и Н.Н. Le Houérou (1992), *A. canescens* используется и в других программах по планированию и восстановлению деградированных пастбищных угодий. Этот вид эффективен в районах с чрезмерным засолением, засушливостью и необходимостью в корме для животных в периоды засух. Тем не менее, на современных пастбищах *A. canescens* является экзотическим видом, поэтому следует рассмотреть возможность включения в них местных видов, таких как лебеда соляная (*A. halimus* L.) – выносливый кормовой кустарник, устойчивый к засухе, скелетным почвам и засолению (INRF ..., 2004), который, повышая продуктивность прочих растений и животных, может улучшить качество почвы на малоплодовитых и деградированных территориях. Результаты исследования этого вида в Джельфе показали 80% успеха и возможность для большого пространственного охвата благодаря способности этого вида к рассеиванию семян (Tolba, 1994).

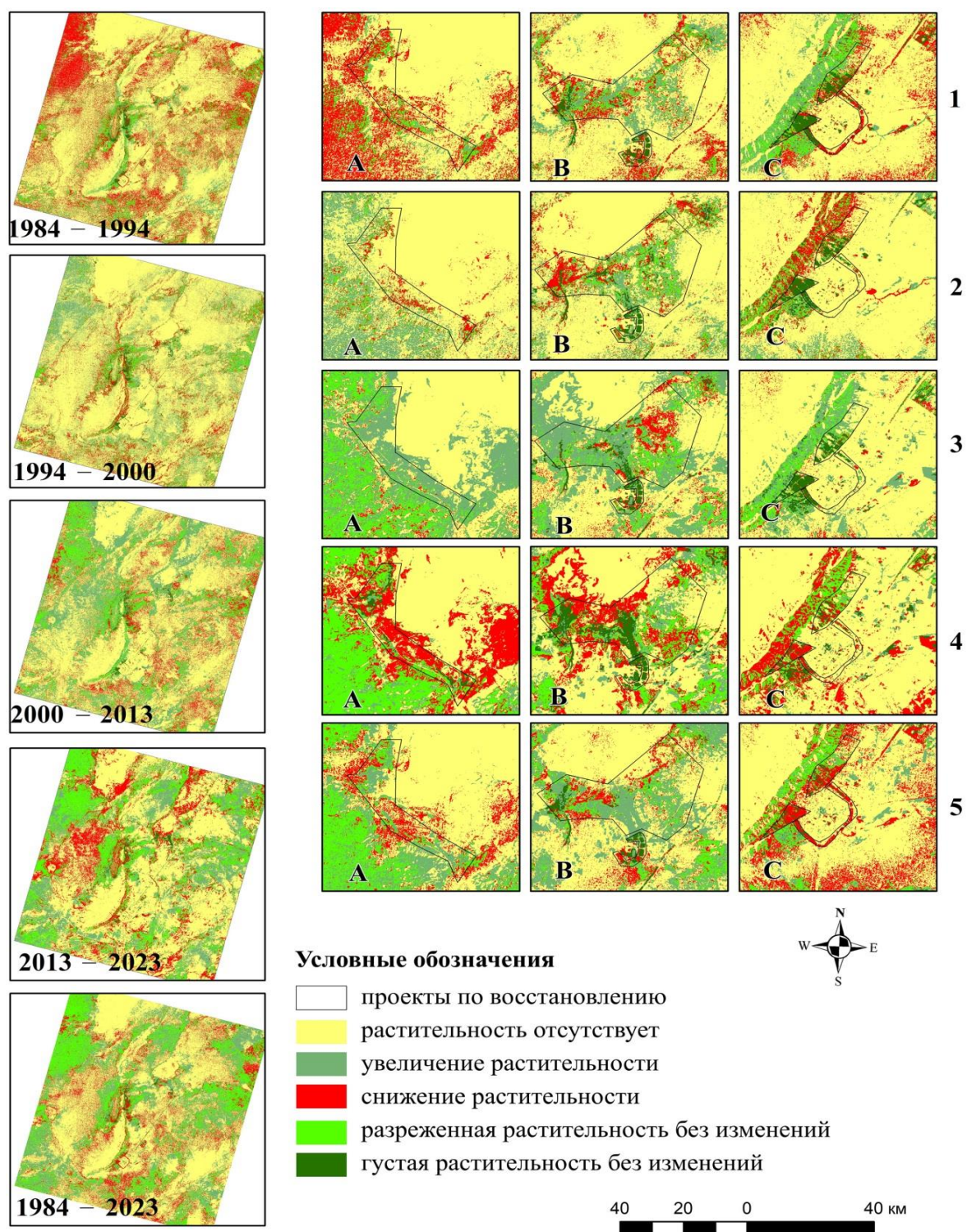
**Таблица 4.** Распространение видов растений, использованных в проектах по восстановлению, и продолжительность самих проектов.

Тип насаждений	Вид растений	Метод посадки	Годы
Массовая высадка деревьев	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Саженьцы	1972-1985
Зеленый пояс	<i>P. halepensis</i> , <i>Cypress</i> spp., <i>Tamarix articulata</i>		1972-1985
Закрепление песчаных дюн	<i>T. articulata</i> , <i>Retama raetam</i>	Сеянцы, саженцы	1994
Пастбища	<i>Atriplex canescens</i>		2007

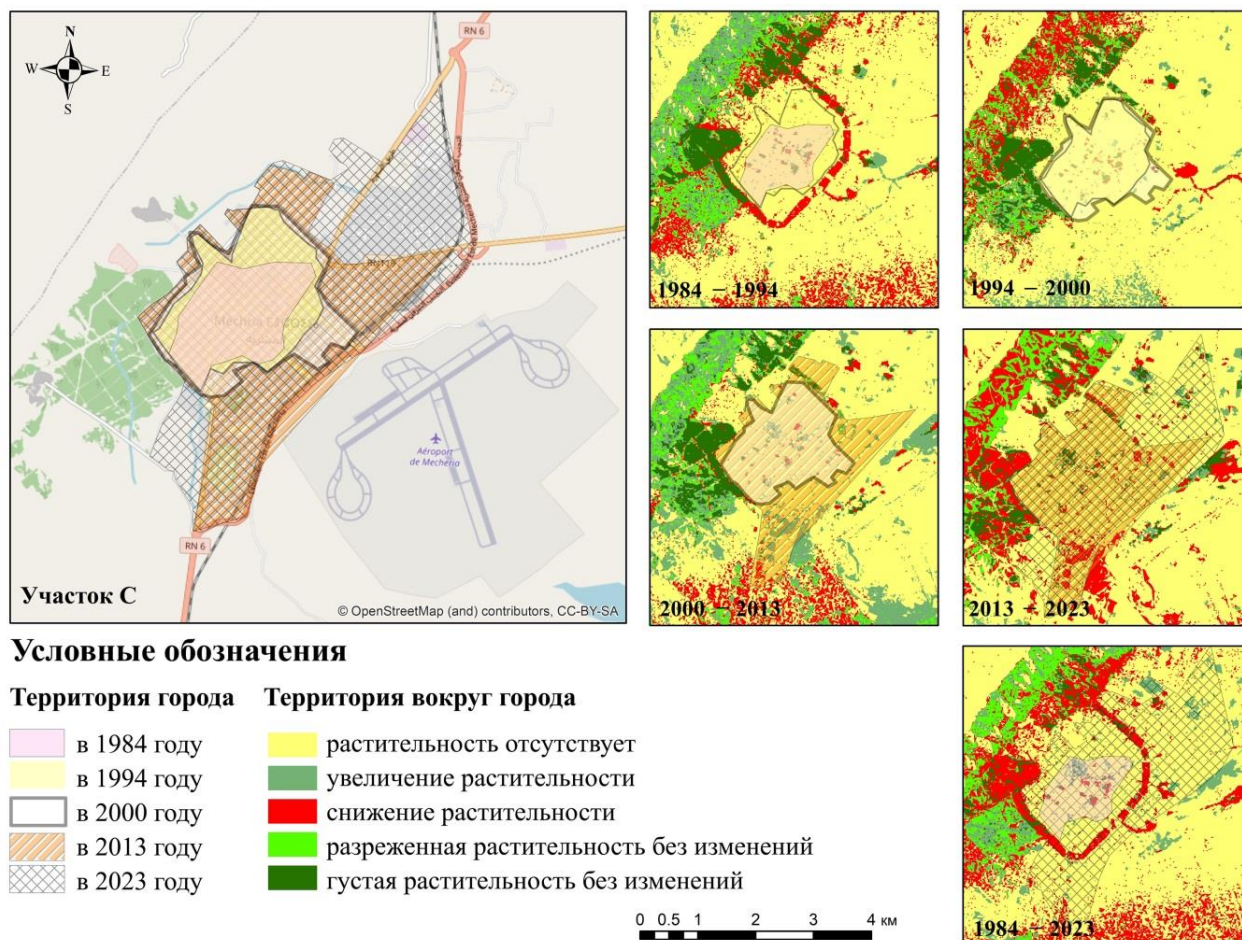
Проекты по закреплению песчаных дюн показали заметное увеличение растительности с 1984 по 2023 год на ключевом участке В (рис. 5, 6) – в основном за счет использования *Tamarix articulata* и *Retama raetam*. Исследование D. Bachir (1993) по закреплению дюн в Айн-Бен-Хелиле показало, что количество проростков *T. articulata* может достигать 93 шт. на 1 м<sup>2</sup>, что свидетельствует о его устойчивости к перевыпасу скота, превосходящей устойчивость хвойных деревьев, а значит, оправдывающее широкое использование тамарикса на пастбищах. Однако проекты, использовавшие *Pinus halepensis* и *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., не привели к восстановлению исследуемой территории (рис. 5), а некоторые виды и вовсе деградировали из-за опустынивания, вырубки лесов под города и местного климата в целом. В исследовании D. Khadidja и S. Taueb (2020), посвященном влиянию *P. halepensis*, *Cupressus sempervirens* L. и *E. camaldulensis* на физико-химические свойства почвы в степном регионе Наамы, были отмечены изменения в параметрах почвы.

Внедрение древесных пород повлияло на физико-химические параметры верхних горизонтов почвы, что привело к накоплению растительных остатков и окислению почвы – процессам, которые обычно не наблюдаются в регионах с исходной степной растительностью. Выбор видов при восстановлении лесов отчасти зависит от качества пород, поскольку должны быть учтены рыхлые почвы среднего плодородия. *Retama raetam*, признанная видом аридных и полуаридных зон и способная адаптироваться к самым экстремальным засухам и засолению благодаря своей ксероморфной морфологии и структуре (Mekki, 2016), играет очень важную роль в поддержании баланса природной среды и экосистем. Согласно R. Mittler (2002), ретама хорошо адаптируется к самым неблагоприятным условиям. Она развивает молекулярный механизм, который позволяет ей

противостоять климатическим изменениям (например, дефициту питательных веществ и воды), частично погружая ее в спячку и подавляя экспрессию определенных генов с помощью защитного фермента – аскорбатпероксидазы.



**Рис. 5.** Изменение растительного покрова. Условные обозначения: 1 – в 1984-1994 гг., 2 – в 1994-2000 гг., 3 – в 2000-2013 гг., 4 – в 2013-2023 гг., 5 – в 1984-2023 гг.; А, В, С – ключевые участки проведения проектов по восстановлению.



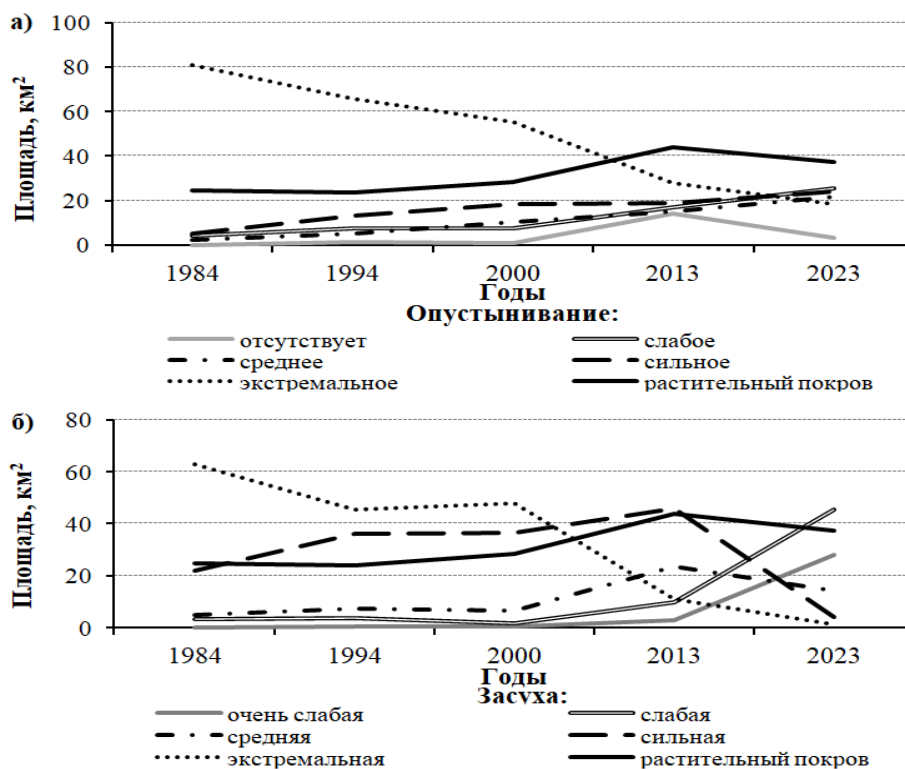
**Рис. 6.** Расширение города Мешерия на ключевом участке С за период 1984-2023 гг.

Болеет того, благодаря крайне развитой корневой системе *R. raetam* способна закреплять дюны: по данным М. Zohary (1962), ее корни проникают на глубину до 20 метров. Согласно А. Farchichi (1997), поскольку ретама имеет высокий потенциал прорастания, устойчивость к дефициту влаги и специфическое разветвление корней, она может считаться пионерным видом, способным колонизировать дюны. По этой причине ретаме рекомендуется использовать для восстановления растительности в подобных условиях. Благодаря очень высокой симбиотической способности *R. raetam* хорошо удобряет засоленные и бедные почв, а также играет важную роль в круговороте азота.

На рисунке 7 и 8 показаны изменения степени опустынивания, засухи и площади растительного покрова на ключевом участке В, где с 1984 по 2023 год осуществлялись два проекта: закрепление песчаных дюн и высадка зеленого пояса. Наши данные свидетельствуют о значительном увеличении растительного покрова на данном участке – с 24.73 до 37.54 км<sup>2</sup> (рис. 9). Одновременно заметно сократилась площадь, подверженная экстремальному опустыниванию – с 80.94 до 18.44 км<sup>2</sup>.

Кроме того, увеличение растительного покрова сопровождалось значительным снижением засухи: за тот же период площадь, подверженная экстремальной засухе, сократилась с 62.97 до 1.29 км<sup>2</sup> (рис. 8, 9). С момента своего начала в 1993 году проект по закреплению песчаных дюн показал постоянный прирост и широкое распространение двух задействованных видов: *Tamarix articulata* и *R. raetam*. Этот результат поможет снизить опустынивание, стабилизировать дюны и улучшить общую экологическую обстановку региона.

И наоборот, проект по созданию зеленого пояса, в котором использовалась *Pinus halepensis*, не показал ни изменений с 1984 по 2023 год, ни естественного восстановления данного вида (Zair, 2011), хотя, безусловно, сыграл эффективную роль в защите жилого района Эль Биод от ветров, несущих песок.



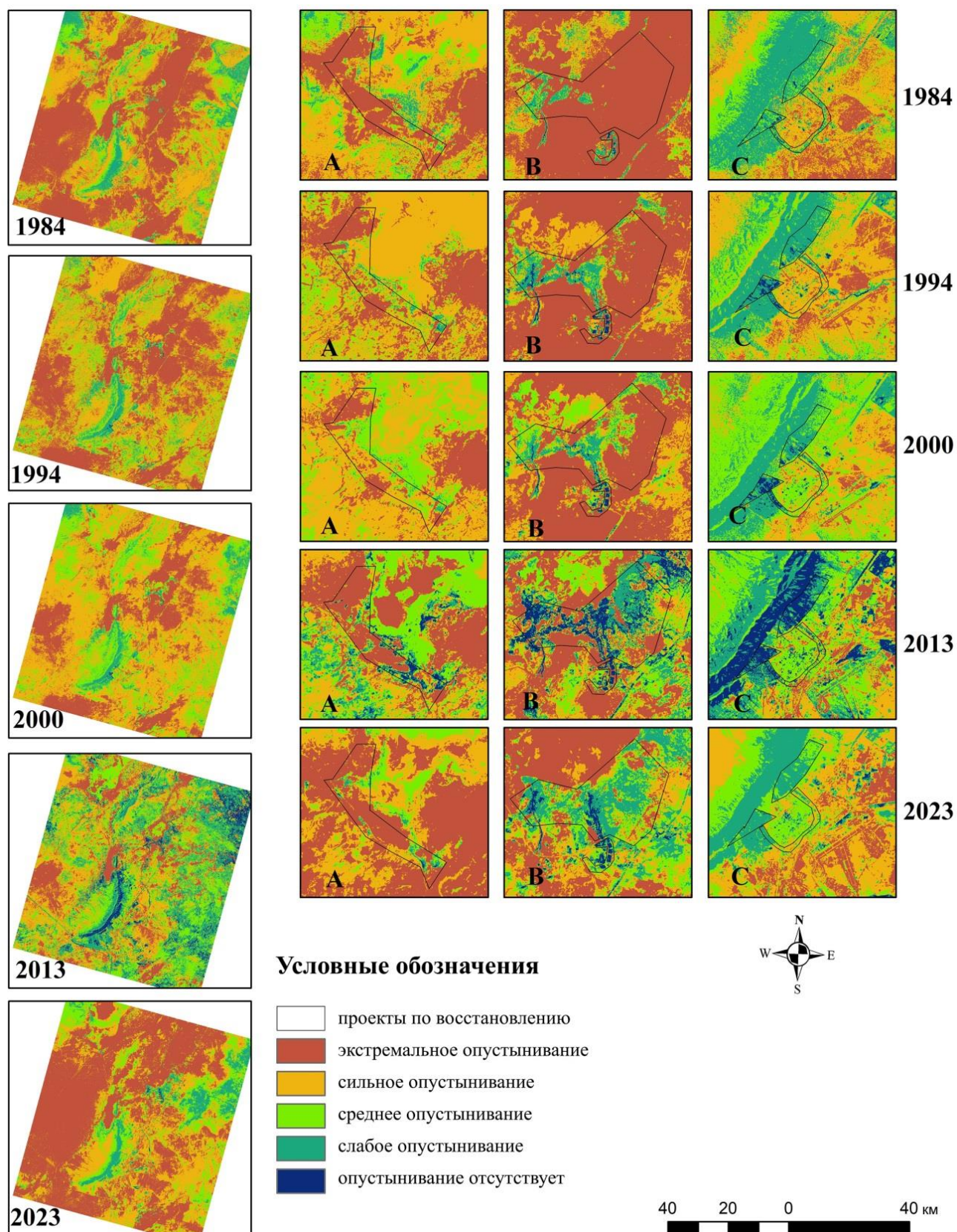
**Рис. 7.** Изменения площади растительного покрова (км<sup>2</sup>) на ключевом участке В в зависимости от степени опустынивания (а), уровня засухи (б).

### Выводы

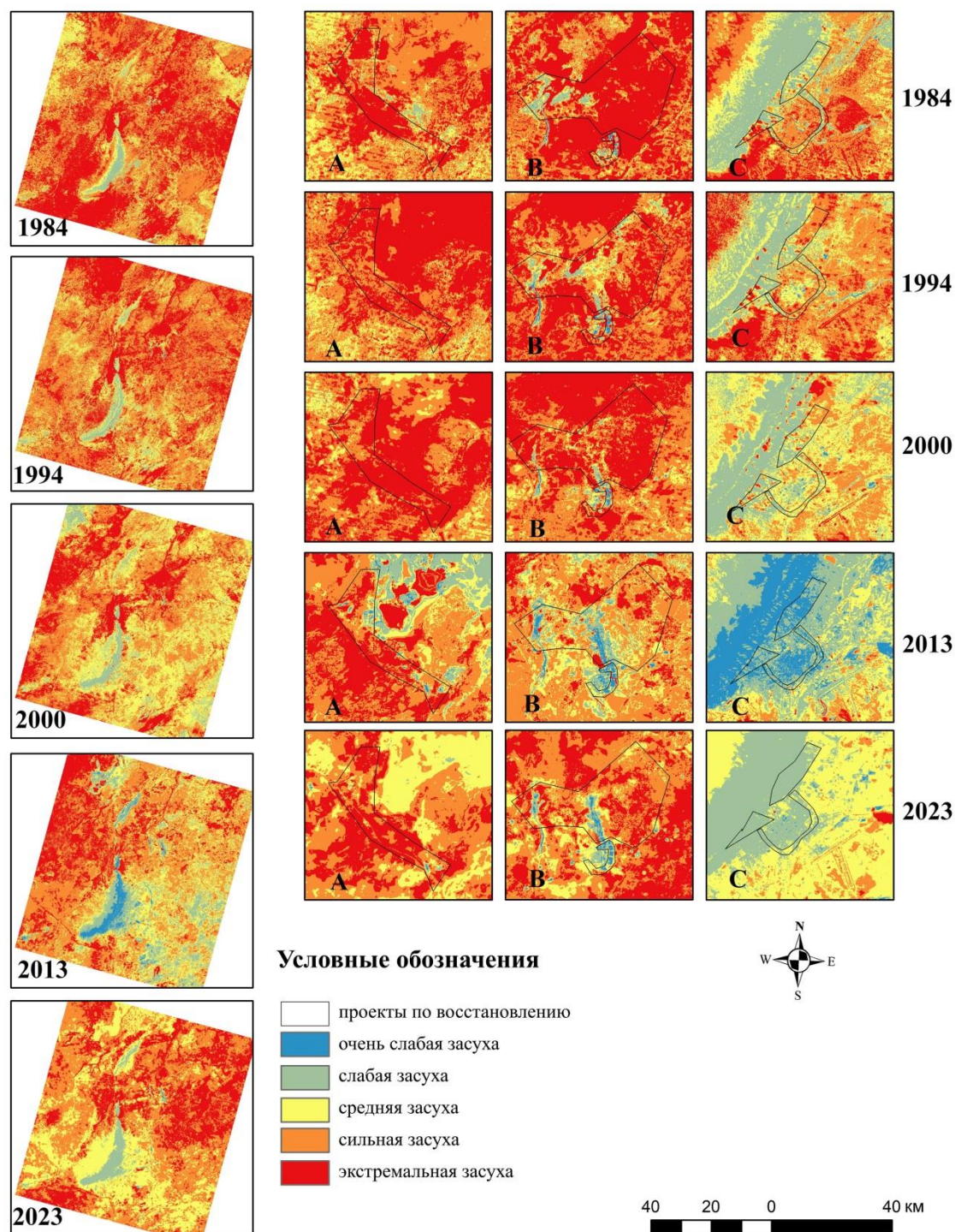
Данное исследование подчеркивает важную роль целевых проектов по восстановлению среды и борьбе с опустыниванием в северном регионе провинции Наама. Построив подробную карту изменений растительного покрова с 1984 по 2023 год, мы оценили эффективность таких проектов в долгосрочной перспективе. Для создания карт опустынивания и засухи за 1984, 1994, 2000, 2013 и 2023 годы мы использовали новый подход, в котором применили нечеткую логику с Гауссовой функцией принадлежности. Результаты показали, что эффект от проектов по восстановлению весьма неоднозначны. Например, состояние ключевого участка А, на котором были созданы пастбища, ухудшился из-за перевыпаса скота, вызванного климатическими изменениями и сокращением осадков. На участке В, где велось укрепление песчаных дюн, растительный покров значительно улучшился, что впоследствии снизило степень опустынивания, зафиксировало песчаные дюны и облегчило условия засухи. И наоборот, участок С, известный своими проектами по массовой посадке деревьев и созданию зеленых поясов, столкнулся с проблемами, вызванными расширением городов и, как следствие, вырубками.

Такие результаты позволяют нам сделать несколько ключевых выводов.

- Тщательное планирование и оптимальное землепользование: планирование и детальное понимание земельных условий необходимы для успеха проектов по восстановлению среды.
- Экономическая и экологическая ценность: проекты должны разрабатываться с учетом их долгосрочных экономических и экологических выгод для региона.
- Выбор видов растений: использование видов, способных выдерживать колебания климатических условий, перепады температур и нехватку воды, таких как *Atriplex halimus* L., *A. canescens*, *Tamarix articulata* и *Retama raetam*, имеет решающее значение.
- Данные выводы подчеркивают важность адаптивных стратегий и хорошей информированности при принятии решений для восстановления окружающей среды и достижения устойчивого результата.



**Рис. 8.** Степень опустынивания за период 1984-2023 гг. на трех ключевых участках А, В, С, где проводились проекты по восстановлению.



**Рис. 9.** Уровень засух за период 1984-2023 гг. на трех ключевых участках А, В, С, где проводились проекты по восстановлению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Abdellaoui A., Rougab A.* 1997. Caractérisation du bâti en zone de transition Montagne Plaine: cas de l'agglomération blidéenne (Algérie) // Télédétection des milieux urbains et périurbains, AUPELF/UREF Ed. P. 75-83.
- Abdellaoui A., Marmi R.* 2010. Mise en évidence de mouvements de sable à partir d'images satellitaires; application au piémont sud de l'atlas saharien (Algérie) // Annals of the University of Bucharest. Geography Series. Vol. 59. 14 p.
- Aidoud A., Touffet J.* 1996. La régression de l'alfa (*Stipa tenacissima* L.), graminée pérenne, un indicateur de désertification des steppes algériennes // Science et Changements Planétaires. Sécheresse. Vol. 7. No. 3. P. 187-193.
- Ajaj Q.M., Pradhan B., Noori A.M., Jebur M.N.* 2017. Spatial Monitoring of Desertification Extent in Western Iraq

- Using Landsat Images and GIS // *Land Degradation & Development*. Vol. 28. No. 8. P. 2418-2431.
- Bachir D.* 1993. Contribution à l'étude du comportement du *Tamarix articulata* (Vahl) dans la lutte contre l'ensablement. PhD Thesis. Algeria: Tlemcen University. 121 p.
- Bajji M., Kinet J.M., Lutts S.* 2002. Osmotic and Ionic Effects of NaCl on Germination, Early Seedling Growth, and Ion Content of *Atriplex halimus* (Chenopodiaceae) // *Canadian Journal of Botany*. Vol. 80. No. 3. P. 297-304.
- Baret F., Guyot G., Major D.* 1989. TSAVI: A Vegetation Index which Minimizes Soil Brightness Effects on LAI or APAR Estimation // 12<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS, July 1990, Vancouver, Canada. P. 10-14.
- Borrelli P., Panagos P., Ballabio C., Lugato E., Weynants M., Montanarella L.* 2016. Towards a Pan-European Assessment of Land Susceptibility to Wind Erosion // *Land Degradation & Development*. Vol. 27. No. 4. P. 1093-1105.
- Brunner C., Leeb R., Müller-Putz G., Schlögl A., Pfurtscheller G.* 2008. BCI Competition 2008 – Graz Data Set A. Institute for Knowledge Discovery, Laboratory of Brain-Computer Interfaces, Graz University of Technology. Vol. 16. P. 1-6.
- Sekkal M.C., Ziani Z., Mahdad M.Y., Meliani S.M., Baghl, M.H., Bessenouci M.Z.* 2024. Assessing the Wind Power Potential in Naama, Algeria to Complement Solar Energy through Integrated Modeling of the Wind Resource and Turbine Wind Performance // *Energies*. Vol. 17. Article No. 785.
- Chen Y.* 2023. Monitoring Land Use/Land Cover Change (LULCC) Using Remote Sensing // *E3S Web of Conferences*. Vol. 424. P. 03002.
- Curtis P.G., Slay C.M., Harris N.L., Tyukavina A., Hansen M.C.* 2018. Classifying Drivers of Global Forest Loss // *Science*. Vol. 361. No. 6407. P. 1108-1111.
- Eastman J.R.* 2009. IDRISI Taiga Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs Clark University, Worcester, MA: Clark University. 342 p.
- ESRI – Environmental Systems Research Institute. 2023. How Natural Breaks (Jenks) Works. ArcGIS Pro Documentation [Электронный ресурс <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/resources> (дата обращения 10.11.2024)].
- Ewing R.* 1997. Is Los Angeles–Style Sprawl Desirable? // *Journal of the American Planning Association*. Vol. 63. No. 1. P. 107-126.
- Farchichi A.* 1997. La lutte contre l'ensablement et pour la stabilisation des dunes: Essai de la fixation biologique des dunes en Tunisie présaharienne. Recherches sur la désertification dans la Jeffara // *Revue tunisienne de géographie*. Vol. 12. P. 49-102.
- Feng Q., Chaubey I., Engel B., Cibir R., Sudheer K.P., Volenec J.* 2017. Marginal Land Suitability for Switch Grass, Miscanthus and Hybrid Poplar in the Upper Mississippi River Basin (U.M.R.B.) // *Environmental Modelling & Software*. Vol. 93. P. 356-365.
- Fiorillo E., Maselli F., Tarchiani V., Vignaroli P.* 2017. Analysis of Land Degradation Processes on a Tiger Bush Plateau in South West Niger Using MODIS and LANDSAT TM/ETM+ Data // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 62. P. 56-68.
- Greco J.* 1966. L'érosion, la défense et la restauration des sols. Le reboisement en Algérie. Alger: Ministère de l'agriculture et de la réforme agraire. 393 p.
- Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N.A.* 2019. Urban Vegetation Classification with NDVI Threshold Value Method with Very High Resolution (VHR) Pleiades Imagery // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. 42. P. 237-240.
- HCDS – Haut Commissariat au Développement de la Steppe. 2014. Problématique des zones steppiques et perspectives de développement. Rapport Synthétique. 10 p.
- INRF – Integrated Nanosystems Research Facility. 2004. Guide des principaux arbres et arbustes du Sahara central (Ahaggar et Tassili). 141 p.
- Jenks G.F.* 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping // *International Yearbook of Cartography*. Vol. 7. P. 186-190.
- Khadidja D., Tayeb S.* 2020. Effects of Land Use Changes on the Soil Physicochemical Properties in South-Western Algeria // *Ekológia (Bratislava)*. Vol. 39. No. 3. P. 224-235.
- Khalid F., Benabdeli K., Mosli B.* 2015. Impact de la mise en défense sur la lutte contre la désertification dans les parcours steppiques: cas de la région de Naâma (sud-ouest algérien) // *Revue d'Écologie*. Vol. 70. No. 1. P. 16-31.
- Klir G.J., Yuan B.* 1995. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. New Jersey: Prentice Hall. P. 1-12.
- Kosko B.* 1992. Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence. Prentice-Hall, Inc. 224 p.
- Le Houérou H.N.* 1992. The Role of Saltbushes (*Atriplex* spp.) in Arid Land Rehabilitation in the Mediterranean Basin: A Review // *Agroforestry Systems*. Vol. 18. P. 107-148.
- Lewis S.M., Fitts G., Kelly M., Dale L.* 2014. A Fuzzy Logic-Based Spatial Suitability Model for Drought-Tolerant Switch Grass in the United States // *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 103. P. 39-47.

- Maasikamäe S., Hass H., Jürgenson E.* 2011. The Impact of Uncontrolled Development on the Use of Arable Land // Proceedings of The Fifth International Scientific Conference Rural Development. P. 24-25.
- Mamdani E.H.* 1974. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. Vol. 121. No. 12. P. 1585-1588.
- Mamdani E. H., Assilian S.* (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man–Machine Studies*, 7(1), 1–13.
- MATE – Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. 2002. Rapport Annuel du Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD). 140 p.
- Mbow C., Brandt M., Ouedraogo I., De Leeuw J., Marshall M.* 2015. What Four Decades of Earth Observation Tell us about Land Degradation in the Sahel? // *Remote Sensing*. Vol. 7. No. 4. P. 4048-4067.
- Mekki A.* 2016. Contribution à l'étude écologique de l'Arthropodofaune dans quelques stations à Retama raetam (Fabacées) dans la région de Naâma. Article No. 132816432.
- Mittler R.* 2002. Living under a Dormant Canopy: a Molecular Acclimation Mechanism of the Desert Plant *Retama raetam* // *The Plant Journal*. Vol. 25. No. 4. P. 407-416.
- Mohebbi Tafreshi G., Nakhaei M., Lak R.* 2021. Land Subsidence Risk Assessment Using GIS Fuzzy Logic Spatial Modeling in Varamin Aquifer, Iran // *GeoJournal*. Vol. 86. No. 3. P. 1203-1223.
- Richardson A.J., Wiegand C.L.* 1977. Distinguishing Vegetation from Soil Background Information // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 43. No. 12. P. 1541-1552.
- Ross T.J.* 2010. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. John Wiley & Sons. 585 p.
- Sahebjalal E., Dashtekian K.* 2013. Analysis of Land Use–Land Covers Changes Using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Differencing and Classification Methods // *African Journal of Agricultural Research*. Vol. 8. No. 37. P. 4614-4622.
- SiTayeb T.* 2016. Impact of Climate Change and Anthropogenic Activities in the Dynamics of Land Cover in Mediterranean Steppe West Algeria // *Living Planet Symposium / Ed. L. Ouwehand*. Praha. P. 157.
- Slocum T.A., McMaster R.B., Kessler F.C., Howard H.H.* 2008. *Thematic Cartography and Geovisualization*. Pearson Prentice Hall. 528 p.
- Squires G.D.* 2002. *Urban Sprawl: Causes, Consequences and Policy Responses*. Lanham, Maryland: Rowman & Littlefield Publishers. 404 p.
- Steffen W., Sanderson A., Tyson P.D., Jüger J., Matson P.A., Moore III B., Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.J., Turner II B.L., Wasson R.J.* 2004. *Global Change and the Earth System: A Planet under Pressure*. Germany: Springer Berlin, Heidelberg. 336 p.
- Tolba K.* 1994. Stabilisation et reboisements des formations éoliennes à El Mesrane (Djelfa) // Symposium "Wind Erosion in West Africa", Allemagne, Décembre 1994. P. 191-207.
- Turan İ.D., Dengiz O., Özkan B.* 2019. Spatial Assessment and Mapping of Soil Quality Index for Desertification in the Semi-Arid Terrestrial Ecosystem Using MCDM in Interval Type-2 Fuzzy Environment // *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 164. P. 104933.
- UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification. 1994. Elaboration d'une Convention Internationale sur la Lutte contre la Désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et ou la désertification, en particulier en Afrique. Texte final de la Convention. A/AC.241/27, 12 Septembre 1994 [Электронный ресурс <https://www.environmental-mainstreaming.org/nssd/references/Conventions/ccdfre.htm> дата обращения 10.11.2024].
- USGS. 2024. [Электронный ресурс <https://www.usgs.gov/> дата обращения 10.11.2024].
- Vicente-Serrano S.M., Cabello D., Tomás-Burguera M., Martín-Hernández N., Beguería S., Azorin-Molina C., El Kenawy A.* 2015. Drought Variability and Land Degradation in Semiarid Regions: Assessment Using Remote Sensing Data and Drought Indices (1982-2011) // *Remote Sensing*. Vol. 7. No. 4. P. 4391-4423.
- Zadeh L.A.* 1965. Fuzzy Sets // *Information and Control*. Vol. 8. No. 3. P. 338-353.
- Zadeh L.A.* 1973. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. SMC 3 (1). P. 28-44.
- Zair M.* 2011. Bilan écologique et socio-économique des reboisements dans la wilaya de Naâma et perspectives d'avenir. 3 p.
- Zhang Y., Degroote J., Wolter C., Sugumaran R.* 2009. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS Framework to Assess Soil Erosion Risk // *Land Degradation & Development*, Vol. 20. No. 1. P. 84-91.
- Zohary M.* 1962. Deserts and Near Deserts: Plant Life of Palestine, Israel and Jordan // *Science*. Vol. 136. No. 3515. 262 p.