

Метод картографирования сезонной динамики площадей открытых песков и дефлированных территорий на основе спутниковых данных высокого разрешения и машинного обучения

С. С. Шинкаренко¹, С. А. Барталев¹, А. Б. Биарсланов², В. С. Полтарин¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru*

² *Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН
Махачкала, 367000, Россия*

Рост площадей открытых песков и дефлированных территорий в последние годы стал существенной проблемой на юго-востоке европейской части России. Дегradация растительного покрова приводит к интенсификации дефляционных процессов вплоть до катастрофических пыльных бурь, результатом которых становится ещё больший рост площадей открытых песков. В этой связи спутниковый мониторинг сезонных и многолетних изменений площадей дефлированных территорий, лишённых растительного покрова, очень актуален. Автоматизированные методы классификации спутниковых изображений требуют проведения трудоёмкой процедуры создания опорной выборки на каждую дату съёмки, а экспертное дешифрирование характеризуется ещё большими трудозатратами. Решением может быть использование универсальных экспертных пороговых значений для вегетационных индексов и коэффициента спектральной яркости (КСЯ). В настоящем исследовании предложен подход для формирования опорной выборки на основе экспертного порога, который был обоснован с использованием аэросъёмки беспилотным летательным аппаратом. Установлено, что наиболее тесная связь с долей площади открытых песков в пикселе характеризуется КСЯ в красном диапазоне и NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index). Предложенный подход позволяет получать карты открытых песков и дефлированных территорий трижды в год на основе трёхмесячных композитных изображений Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м или более часто по данным более высокого временного разрешения. Проведённая верификация результатов показала применимость метода для картографирования сезонной динамики площадей открытых песков и дефлированных территорий в Северо-Западном Прикаспии.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, дистанционное зондирование, опустынивание, дефляция, бустинг

Одобрена к печати: 05.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-207-221

Проблема спутникового мониторинга сезонной динамики площадей открытых песков и дефлированных территорий

Нерациональное использование земель на лёгких почвах приводит к интенсификации процессов дефляции вплоть до полной утраты растительного покрова. В последние несколько лет подобная проблема усугубилась на юго-востоке европейской части России, где из-за несоблюдения допустимых пастбищных нагрузок и неблагоприятных гидротермических условий существенно выросла площадь открытых песков и дефлированных территорий, практически полностью лишённых растительности (Шинкаренко и др., 2024; Kulik et al., 2020; Shinkarenko et al., 2023). Последствием этого стало усиление дефляционных процессов вплоть до возникновения масштабных пыльных бурь, песчано-пылевые шлейфы которых достигали центральных регионов Беларуси и Украины (Шинкаренко, Барталев, 2024). Пыльные бури в свою очередь приводят к резкому значительному росту дефлированных площадей, лишённых растительного покрова (Шинкаренко, Барталев, 2020, 2022). В течение вегетационного периода часть дефлированных площадей и подвижных песков может зарастать растительностью, из-за чего их площадь сокращается (Биарсланов и др., 2023; Дорошенко, 2024). Мониторинг и своевременное принятие мер по снижению пастбищных

нагрузок и проведению фитомелиоративных мероприятий могут позволить избежать катастрофического усиления дефляции и пыльных бурь (Kulik et al., 2018). При этом крайне важно учитывать сезонную динамику площади открытых песков, поскольку существуют «ядра» дефляции (деструктивные и деструктивно-аккумулятивные области), остающиеся практически неизменными в течение всего года, а также нестабильные области аккумуляции эолового материала, площадь которых в течение года может как расти, так и снижаться (Биарсланов и др., 2023). Оценка многолетней динамики площадей открытых песков и дефлированных территорий без учёта их сезонной изменчивости может сопровождаться неопределённостями, связанными с подбором спутниковых изображений на произвольные даты года (Yuferev et al., 2023). Решением этой проблемы может быть создание ежегодных карт минимальной (стабильной — ядра дефляции) и максимальной (нестабильные участки перевеваемых песков, образующиеся или зарастающие в течение года) площади открытых песков и дефлированных территорий (Биарсланов и др., 2023).

Задачи картографирования площадей открытых песков и дефлированных территорий могут решаться как с помощью методов контролируемой классификации на основе различных алгоритмов, в том числе методов машинного обучения (Биарсланов и др., 2023; Полтарин, Шинкаренко, 2024), так и экспертных методов: визуального дешифрирования (Дорошенко, 2024) или подбора пороговых значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в отдельных диапазонах (Kulik et al., 2015; Yuferev et al., 2023), вегетационных индексов (ВИ) или их сочетаний (Титкова, Золотокрылин, 2022; Шинкаренко и др., 2024). При этом даже для специализированных ВИ, разработанных для идентификации открытых песков, нет универсальных пороговых значений, которые бы позволяли использовать их на произвольной территории в любой отрезок вегетационного периода (Marzouki, Dridri, 2022; Secu et al., 2022; Xu et al., 2009). Подбор пороговых значений для каждой сцены спутникового изображения на каждую дату съёмки достаточно трудоёмок. Экспертное дешифрирование открытых песков по спутниковым изображениям ещё более трудозатратно, из-за чего ограничивается территориями только отдельных районов (Дорошенко, 2024). Также зарастающие перевейные пески и пройденные огнём площади, на которых восстанавливается растительный покров, на участках с лёгкими почвами по дешифровочным признакам схожи с дефлированными территориями (Шинкаренко, 2021), из-за чего могут быть перепутаны между собой при визуальной интерпретации, результаты которой существенно зависят от спектральной контрастности спутниковых изображений (Дорошенко, Мелихова, 2024). Классификация спутниковых данных на основе различных алгоритмов требует создания опорной выборки на каждую дату съёмки, что также становится достаточно трудоёмкой задачей (Биарсланов и др., 2023). В этой связи актуальным представляется решение проблемы создания опорной выборки, которая могла бы применяться при картографировании открытых песков и дефлированных территорий в течение всего вегетационного периода (Полтарин, Шинкаренко, 2024). Наличие композитных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (10–30 м), прошедших процедуру радиометрической нормализации и получаемых ежемесячно и ежеквартально по данным Sentinel-2 (Кашницкий и др., 2022), открывает возможность разработки универсального метода построения обучающей выборки на значительные по площади территории с последующим созданием карт открытых песков и дефлированных территорий в разные периоды года с использованием методов машинного обучения. При решении такой задачи большинство ансамблевых моделей демонстрирует сопоставимую точность, поэтому выбор применяемого метода обуславливается прежде всего его быстродействием. Для задач картографирования открытых песков и дефлированных территорий оптимальным является градиентный бустинг (Полтарин, Шинкаренко, 2024), а источником данных — очищенные от маскирующего влияния облаков трёхмесячные композитные изображения (Шинкаренко и др., 2024).

Цель исследования заключается в разработке метода создания опорной выборки и картографирования внутригодовой динамики открытых песков и дефлированных территорий по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения с использованием машинного обучения.

Метод картографирования открытых песков и дефлированных территорий

Открытые пески и дефлированные участки без растительного покрова характеризуются низкими значениями ВИ, например NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) (Титкова, Золотокрылин, 2022; Шинкаренко, 2021), высокими значениями альbedo и КСЯ (Kulik et al., 2018; Yuferev et al., 2022; Zolotokrylin, Titkova, 2011), особенно в красном диапазоне спектра (Шинкаренко, Барталев, 2024). Совместное использование данных КСЯ и ВИ важно, так как большими КСЯ обладают и частично заросшие растительностью пески, а малыми значениями ВИ — устойчивые против дефляции участки со сработанной надземной фитомассой или растительностью в период покоя. Таким образом, лишённые растительного покрова дефлированные участки могут быть выделены на основе пороговых значений КСЯ и ВИ (Шинкаренко и др., 2024): за счёт низких ВИ распознаются участки без фотосинтезирующей растительности, а высокие КСЯ способствуют отделению открытых песков и дефлированных территорий.

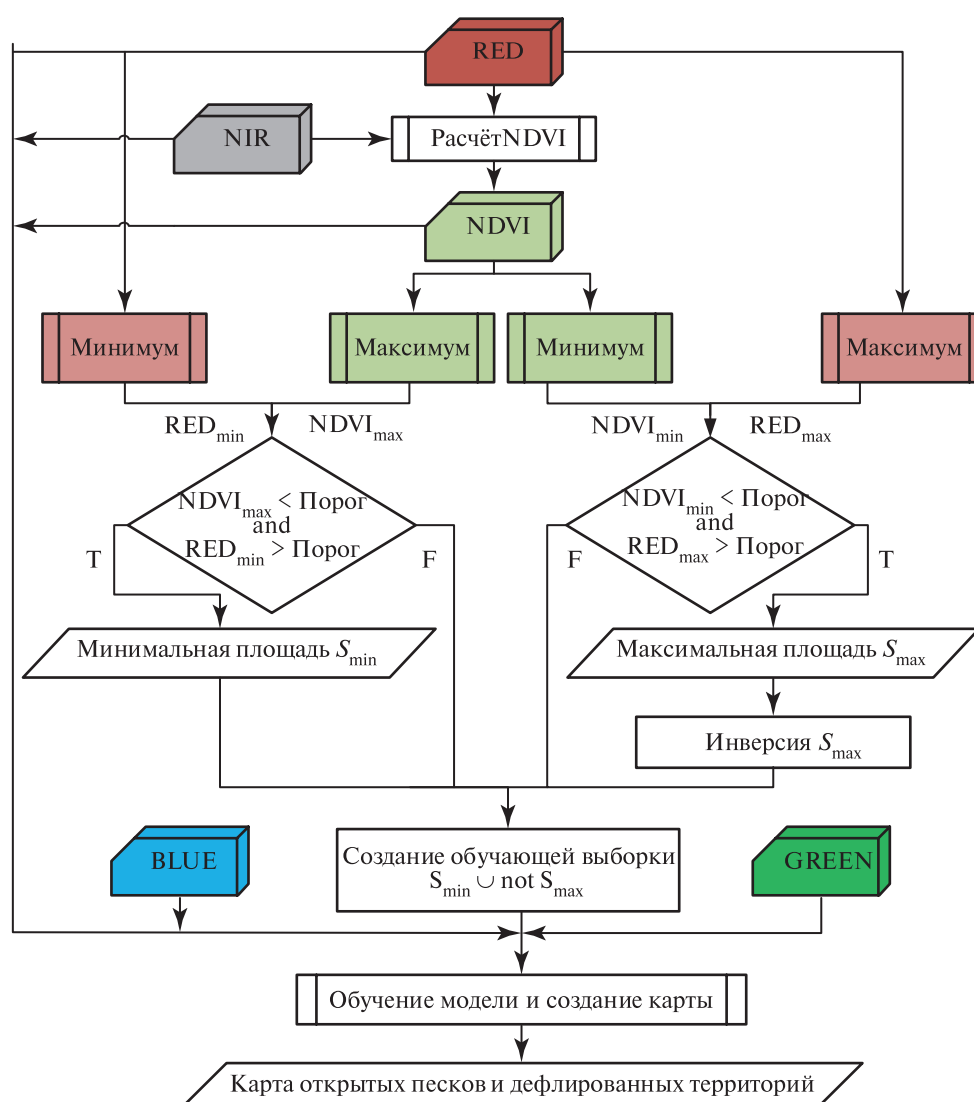


Рис. 1. Блок-схема метода картографирования открытых песков и дефлированных территорий

Ядра дефляции, представленные участками без растительного покрова в течение вегетационного периода, на протяжении всего года имеют низкие ВИ и большие КСЯ. В таком случае максимальное годовое значение ВИ не превысит соответствующее для участков без

растительности, а минимальный КСЯ должен быть не ниже установленного значения КСЯ для открытых песков. Таким образом, часть опорной выборки, которая соответствует открытым пескам и дефлированным территориям, существующим в течение всего года (минимальная площадь $S_{\min}$), может быть получена на основе двух пороговых значений: максимума ВИ и минимума КСЯ или другого показателя, характеризующегося большими значениями на открытых песках (*рис. 1*, см. с. 209).

Если в течение года ВИ хотя бы в один из периодов будет ниже порогового, а КСЯ — выше, то есть основания для отнесения таких участков к зарастающим пескам или областям аккумуляции эолового материала. В таком случае они могут быть выделены, если минимальное значение ВИ за вегетационный период ниже соответствующего порогового для открытых песков, а максимальный КСЯ — выше. Таким образом создаётся маска для поиска открытых песков и дефлированных территорий (максимальная площадь $S_{\max}$), оставшаяся часть территории при этом может быть использована в качестве выборки как площади, на которой не были зафиксированы открытые пески (Полтарин, Шинкаренко, 2024). Полученный растр может подаваться на вход алгоритма классификации или модели машинного обучения в любой из периодов в течение года (см. *рис. 1*). При этом необходимо обоснование соответствующих пороговых значений КСЯ и ВИ. Неизбежно при картографировании открытых песков и дефлированных территорий на основе пороговых значений к ним будут относиться и многочисленные солончаки, растительный покров на которых отсутствует, а значения КСЯ высоки. Поэтому требуется отделение этого типа земель, для чего предварительно была создана карта соровых понижений и солончаков (Шинкаренко, Барталев, 2023).

Обработка спутниковых данных проводилась с использованием сервиса «Bera-Science» (Loupian et al., 2022) и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015), которые обеспечивают доступ как к спутниковым изображениям Landsat и Sentinel-2 на отдельные даты, так и к композитным ежемесячным, трёхмесячным и годовым изображениям по данным Sentinel-2 (Кашницкий и др., 2022). Кроме собственно спутниковых изображений в системе «Bera-Science» также доступны различные ВИ (например, NDVI, EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index) (Huete et al., 2002), SAVI (*англ.* Soil-Adjusted Vegetation Index) (Huete, 1988)), а также инструменты алгебры изображений для выполнения любых расчётов с растровыми данными, включая вычисление различных ВИ (Loupian et al., 2022).

Обоснование пороговых значений для формирования опорной выборки с использованием данных аэросъёмки

Для определения сезонных особенностей взаимосвязи площади открытых песков, дефлированных территорий и спектрально-отражательных характеристик по спутниковым данным в апреле, июле и октябре 2023 г. выполнялась аэросъёмка с использованием беспилотного летательного аппарата DJI Mavic Air. Аэросъёмка осуществлялась с высоты 100 м на трёх участках в Ногайской степи (Тарумовский район Республики Дагестан, *рис. 2*, см. с. 211) общей площадью 23 га, что дало возможность получить ортофотопланы пространственного разрешения 3,5 см на середину весны, лета и осени (*рис. 3*, см. с. 212). Таким образом, набор данных для определения закономерностей спектрально-отражательных свойств территорий с разной долей площади без растительного покрова включает 2310 пикселей спутниковых изображений разрешения 10 м (Sentinel-2), 554 пикселя разрешения 20 м (Sentinel-2) и 210 — разрешения 30 м (Landsat-8, -9).

Выделение открытых песков по данным аэросъёмки проводилось кластеризацией ортофотопланов с последующей группировкой соответствующих пескам кластеров на основе экспертной оценки. Кроме площадей открытых песков на отдельные даты были получены результирующие растры максимальной (объединение разновременных данных) и минимальной (пересечение разновременных данных) площади. Для каждого пикселя спутникового изображения рассчитывались доли площади, занятые открытыми песками. В течение 2023 г. отмечалось зарастание массивов открытых песков преимущественно однолетними растени-

ями (солянка сорная, дурнишник колючий, паслён колючий и др.), пик вегетации которых приходится на летние месяцы. Соответственно, весной 2023 г. отмечались наибольшие площади открытых песков, летом были зафиксированы максимальные значения NDVI, а осенью площадь открытых песков была минимальной (Дорошенко, 2024; Шинкаренко и др., 2024).

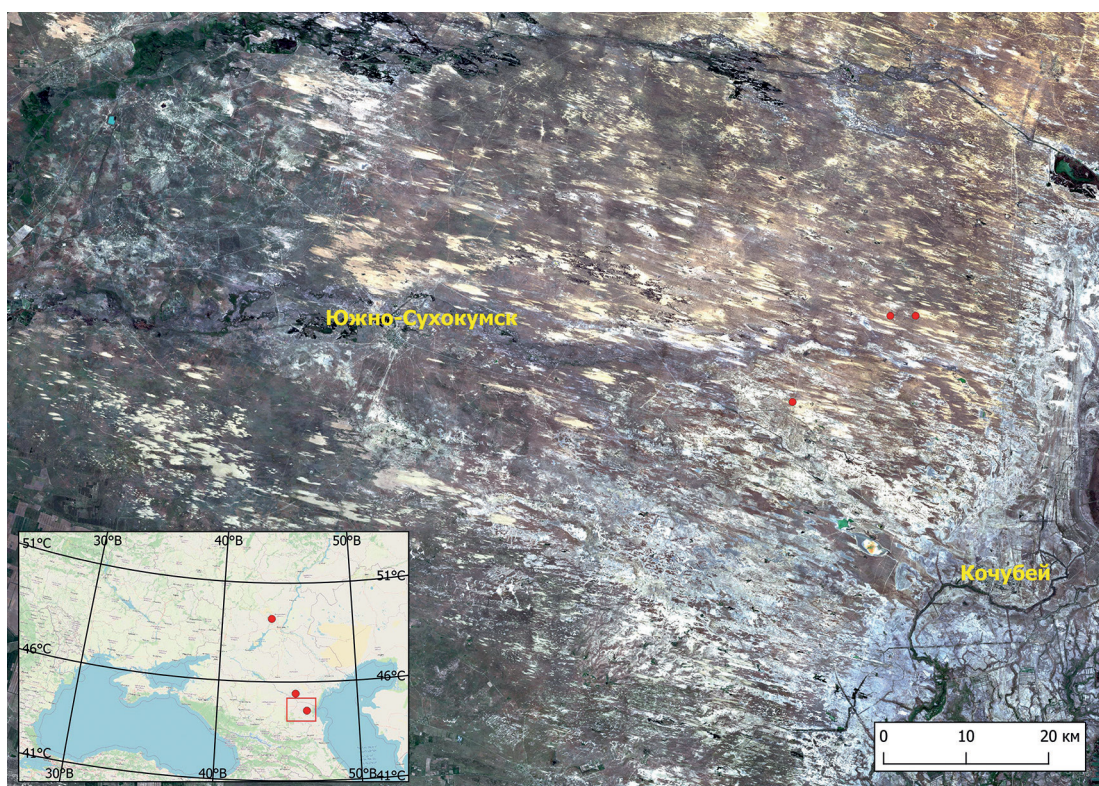


Рис. 2. Территория исследований (красный прямоугольник) и районы проведения аэросъёмки (красные маркеры), трёхмесячное композитное спутниковое изображение Sentinel-2 на весну 2023 г.

Территория исследований охватывается двумя тайлами Sentinel-2: T38TNR, T38TNQ. Для верификации полученных пороговых значений КСЯ и ВИ также использовалась более ранняя аэросъёмка, которая проводилась в мае 2022 г. в Волгоградской области (Арчединско-Донские пески, окрестности хутора Вилтов) и в Калмыкии (окрестности посёлка Комсомольский) на площади 64 и 6 га соответственно (см. рис. 2).

Результаты сопоставления площади участков открытых песков с разной степенью зарастания растительностью с КСЯ и ВИ представлены в табл. 1. Все полученные коэффициенты корреляции значимы, при этом ВИ, которые считаются более устойчивыми к влиянию почвенного покрова (EVI, SAVI, MSAVI (англ. Modified Soil Adjusted Vegetation Index) (Qi et al., 1994)), не показали преимущества по сравнению с NDVI. Специализированные для картографирования открытых песков ВИ с использованием КСЯ в коротковолновом инфракрасном диапазоне (Secu et al., 2022; Xu et al., 2009) требуют использования каналов Sentinel-2 разрешения 20 м, поэтому не позволяют достичь максимального пространственного разрешения получаемых карт. Тем не менее некоторые из них, например NDSAI (англ. Normalized Differential Sandy Areas Index), могут быть довольно перспективными для картографирования открытых песков. Индекс NDSAI эффективно отделяет пески от других почв без растительного покрова (Sahar et al., 2021), характеризуясь сопоставимыми с NDVI значениями коэффициентов корреляции, что даёт возможность использовать NDSAI и подобные ему индексы как при построении опорной выборки, так и в качестве признаков при классификации. Поэтому в будущем точность метода может быть повышена после определения наиболее информативных ВИ либо разработки новых.

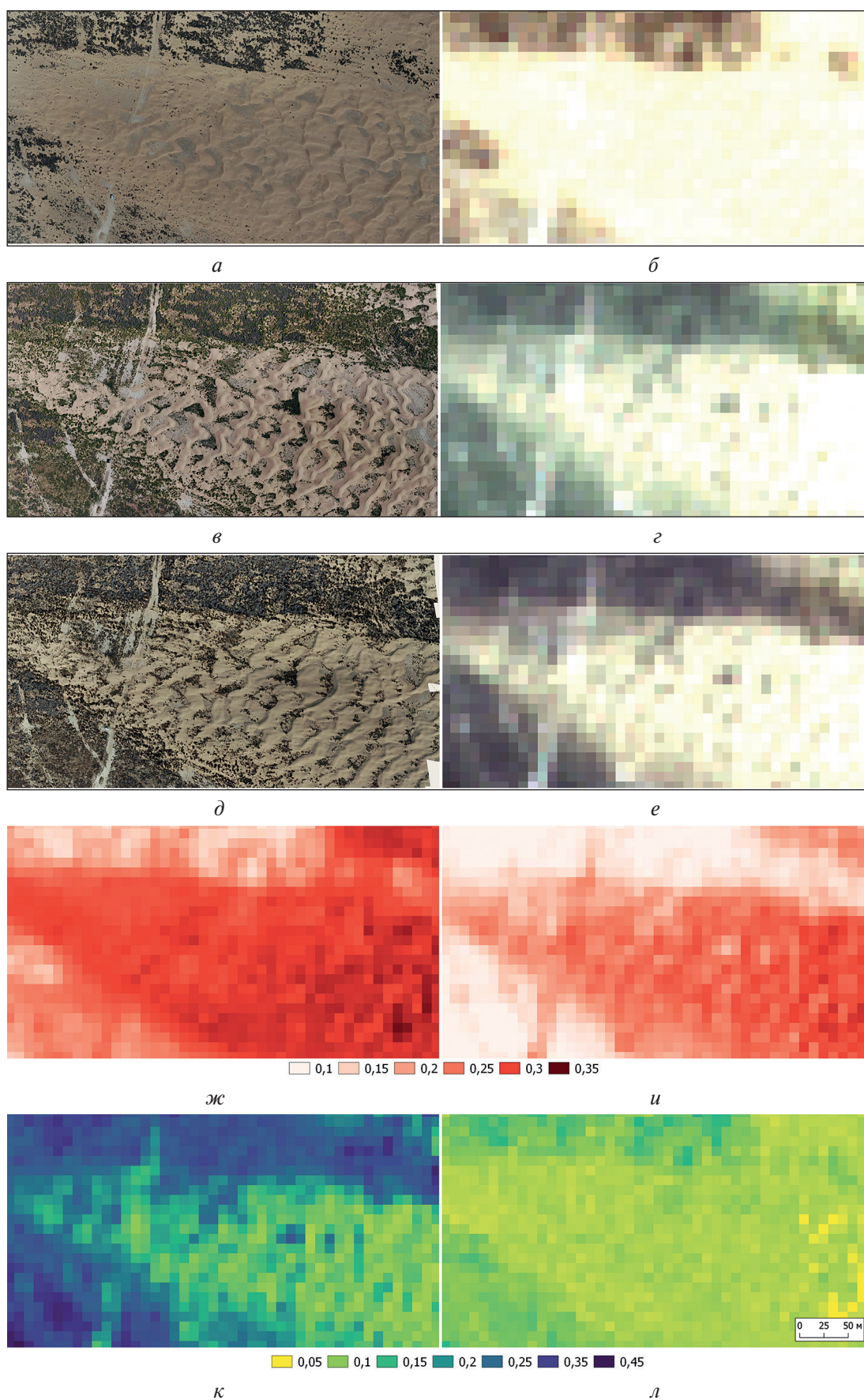


Рис. 3. Пример аэросъёмки (*а, в, д*) и спутниковых изображений Sentinel-2 (*б, г, е*) (синтез в естественных цветах) массива открытых песков в апреле, июле и октябре 2023 г., максимальное (*ж, к*) и минимальное (*и, л*) значение КСЯ в красном диапазоне (*ж, и*) и NDVI (*к, л*) за 2023 г. соответственно

Таблица 1. Коэффициенты корреляции Пирсона площади открытых песков по данным аэросъёмки, КСЯ и ВИ по спутниковым данным

Период определения площади	Даты спутниковых данных	BLUE	GREEN	RED	NIR	NDVI	EVI	SAVI	MSAVI
<i>Спутниковые данные на отдельные даты, Sentinel-2, 10 м</i>									
Апрель	26 апреля	0,88	0,89	0,88	0,76	−0,91	−0,87	−0,87	−0,85
Июль	30 июля	0,84	0,81	0,78	0,65	−0,73	−0,66	−0,71	−0,69
Октябрь	13 октября	0,85	0,81	0,81	0,69	−0,80	−0,76	−0,74	−0,70
Все даты	Все даты	0,85	0,84	0,82	0,70	−0,66	−0,60	−0,61	−0,59
$S_{\max}$	max	0,87	0,85	0,87	0,66	−0,44	−0,33	−0,40	−0,38
$S_{\min}$	min	0,92	0,90	0,89	0,81	−0,65	−0,63	−0,63	−0,61
$S_{\max}$	min	0,67	0,62	0,60	0,45	−0,89	−0,88	−0,88	−0,87
$S_{\min}$	max	0,81	0,83	0,82	0,79	−0,80	−0,73	−0,76	−0,74
<i>Композитные трёхмесячные спутниковые изображения, Sentinel-2, 10 м</i>									
Апрель	Весна	0,72	0,82	0,83	0,61	−0,91	−0,81	−0,84	−0,80
Июль	Лето	0,84	0,81	0,76	0,67	−0,73	−0,63	−0,70	−0,68
Октябрь	Осень	0,83	0,82	0,81	0,71	−0,80	−0,66	−0,68	−0,61
Все даты	Все даты	0,80	0,82	0,80	0,65	−0,75	−0,64	−0,67	−0,63
$S_{\max}$	max	0,58	0,65	0,65	0,44	−0,54	−0,32	−0,42	−0,38
$S_{\min}$	min	0,91	0,90	0,89	0,83	−0,73	−0,62	−0,65	−0,61
$S_{\max}$	min	0,64	0,63	0,61	0,48	−0,90	−0,88	−0,89	−0,87
$S_{\min}$	max	0,75	0,77	0,77	0,67	−0,85	−0,72	−0,77	−0,74
<i>Спутниковые данные на отдельные даты, Sentinel-2, 20 м</i>									
Апрель	26 апреля	0,90	0,91	0,90	0,77	−0,95	−0,93	−0,93	−0,92
Июль	30 июля	0,88	0,84	0,80	0,67	−0,76	−0,68	−0,74	−0,73
Октябрь	13 октября	0,87	0,83	0,83	0,68	−0,89	−0,87	−0,86	−0,84
Все даты	Все даты	0,88	0,86	0,84	0,69	−0,69	−0,62	−0,64	−0,61
$S_{\max}$	max	0,89	0,86	0,88	0,62	−0,43	−0,33	−0,40	−0,39
$S_{\min}$	min	0,95	0,93	0,92	0,82	−0,72	−0,68	−0,68	−0,66
$S_{\max}$	min	0,68	0,62	0,60	0,43	−0,80	−0,85	−0,77	−0,76
$S_{\min}$	max	0,84	0,86	0,86	0,80	−0,82	−0,77	−0,79	−0,77
<i>Композитные трёхмесячные спутниковые изображения, Sentinel-2, 20 м</i>									
Апрель	Весна	0,74	0,84	0,85	0,63	−0,93	−0,83	−0,84	−0,83
Июль	Лето	0,87	0,84	0,79	0,71	−0,74	−0,64	−0,71	−0,69
Октябрь	Осень	0,85	0,83	0,82	0,72	−0,82	−0,69	−0,71	−0,63
Все даты	Все даты	0,82	0,84	0,83	0,67	−0,77	−0,67	−0,72	−0,65
$S_{\max}$	max	0,79	0,80	0,82	0,60	−0,54	−0,30	−0,41	−0,38
$S_{\min}$	min	0,94	0,93	0,92	0,86	−0,70	−0,64	−0,65	−0,62
$S_{\max}$	min	0,64	0,63	0,61	0,47	−0,92	−0,89	−0,90	−0,89
$S_{\min}$	max	0,85	0,86	0,87	0,81	−0,86	−0,73	−0,78	−0,75
<i>Спутниковые данные на отдельные даты, Landsat-8, -9, 30 м</i>									
Апрель	9 мая	0,86	0,89	0,89	0,74	−0,80	−0,80	−0,72	−0,68
Июль	20 июля	0,82	0,83	0,83	0,64	−0,79	−0,73	−0,74	−0,72
Октябрь	25 октября	0,84	0,83	0,84	0,74	−0,85	−0,72	−0,75	−0,69
Все даты	Все даты	0,51	0,59	0,64	0,58	−0,62	−0,56	−0,52	−0,49
$S_{\max}$	max	0,94	0,95	0,96	0,94	−0,57	−0,45	−0,51	−0,48
$S_{\min}$	min	0,93	0,93	0,94	0,88	−0,64	−0,67	−0,62	−0,61
$S_{\max}$	min	0,68	0,66	0,67	0,55	−0,92	−0,91	−0,91	−0,90
$S_{\min}$	max	0,68	0,74	0,76	0,81	−0,89	−0,80	−0,82	−0,79

Таким образом, оптимальными для построения опорных выборок при картографировании открытых песков и дефлированных территорий на юго-востоке европейской части России являются NDVI и КСЯ в красном (RED) диапазоне спектра при использовании данных Landsat и композитных изображений Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м. Коэффициенты спектральной яркости в голубом (BLUE) и зелёном (GREEN) диапазонах спектра также достаточно информативны и рекомендуются для спутниковых данных Sentinel-2 на отдельные даты. В перспективе преимуществом использования КСЯ в красном диапазоне и NDVI становится возможность адаптации метода к данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), имеющим максимальное пространственное разрешение в красном и ближнем инфракрасном (NIR, *англ.* near-infrared spectroscopy) диапазонах, которые применяются и для расчёта NDVI.

На территории исследований проективное покрытие растительности редко превышает 50–70 % (Гасанова и др., 2014; Шинкаренко, Барталев, 2024), поэтому для нижнего порога площади открытых песков в пикселе предлагается использовать 25 %. Сопоставление данных аэросъёмки и спутниковых изображений сопровождается неопределённостями, связанными с погрешностью географической привязки, которая у Sentinel-2 составляет 10–12 м. Также на полученных по ортофотопланам картам открытых песков их площадь может быть несколько занижена из-за изменения условий освещения во время выполнения полётного задания, теней от растительности и барханов, поэтому пороговое значение площади участков, лишённых растительности, в пикселе не должно быть больше 70–90 %. Таким образом, в опорную выборку в категорию без фиксации открытых песков и дефлированных территорий попадают пиксели, для которых их максимальная площадь в течение всего вегетационного периода не превысила 25 %. К открытым пескам и дефлированным территориям в опорной выборке были отнесены пиксели, доля соответствующих категорий в которых была не ниже 75 % на протяжении вегетационного периода. В этом случае пороговое значение отнесения к открытым пескам для минимального КСЯ красного диапазона по трёхмесячным композитным изображениям, соответствующее 5-му перцентилю, будет равно 0,22, а максимального NDVI (95-й перцентиль) — 0,20 (*рис. 4*, см. с. 215). Ряд исследователей также предлагают использовать пороговое значение NDVI, равное 0,2, для идентификации территорий без растительного покрова (Титкова, Золотокрылин, 2022; Kimura et al., 2024). Для выделения пикселей, в которых максимальная площадь открытых песков и дефлированных территорий не превысила 25 %, эти значения составляют 0,15 и 0,21 соответственно. При использовании других источников спутниковых данных (*табл. 2*) или граничных величинах площадей открытых песков в пикселе возможна коррекция пороговых значений КСЯ и NDVI на основе *рис. 4*.

Таблица 2. Пороговые значения минимальных и максимальных значений NDVI и КСЯ в красном диапазоне, соответствующие 95-му и 5-му перцентилем соответственно для формирования опорной выборки при граничных долях площади открытых песков 75 и 25 %

Источник данных	Максимум		Минимум	
	RED	NDVI	RED	NDVI
Спутниковые данные на отдельные даты, Sentinel-2, 10 м	0,24	0,13	0,31	0,15
Спутниковые данные на отдельные даты, Sentinel-2, 20 м	0,25	0,13	0,31	0,15
Композитные трёхмесячные спутниковые изображения, Sentinel-2, 10 м	0,15	0,20	0,22	0,21
Композитные трёхмесячные спутниковые изображения, Sentinel-2, 20 м	0,14	0,15	0,24	0,30
Спутниковые данные на отдельные даты, Landsat-8, -9, 30 м	0,12	0,25	0,19	0,33

Проверка использованных пороговых значений для выделения открытых песков и дефлированных территорий, проведённая в Калмыкии на примере аэросъёмки 2022 г., показала достаточно высокую точность. Точность производителя (полнота) составила 86 % (количество верно определённых пикселей с долей открытых песков более 75 %), доля ложных опре-

делений при этом была менее 1 %. Для участков с покрытием открытыми песками менее 25 % полнота составила 99 % с 1 % ложных определений. Таким образом, несмотря на удалённость участка в Калмыкии и разницу в датах, предложенные пороговые значения продемонстрировали очень высокую точность. Для выполнения классификации крайне важно, что доля ложных определений не превышает 1 % по обоим классам. Таким образом в обучающей выборке оказываются только пиксели, занятые песками на 75 % и более или 25 % и менее в качестве эталонов открытых песков и участков с растительным покровом соответственно.

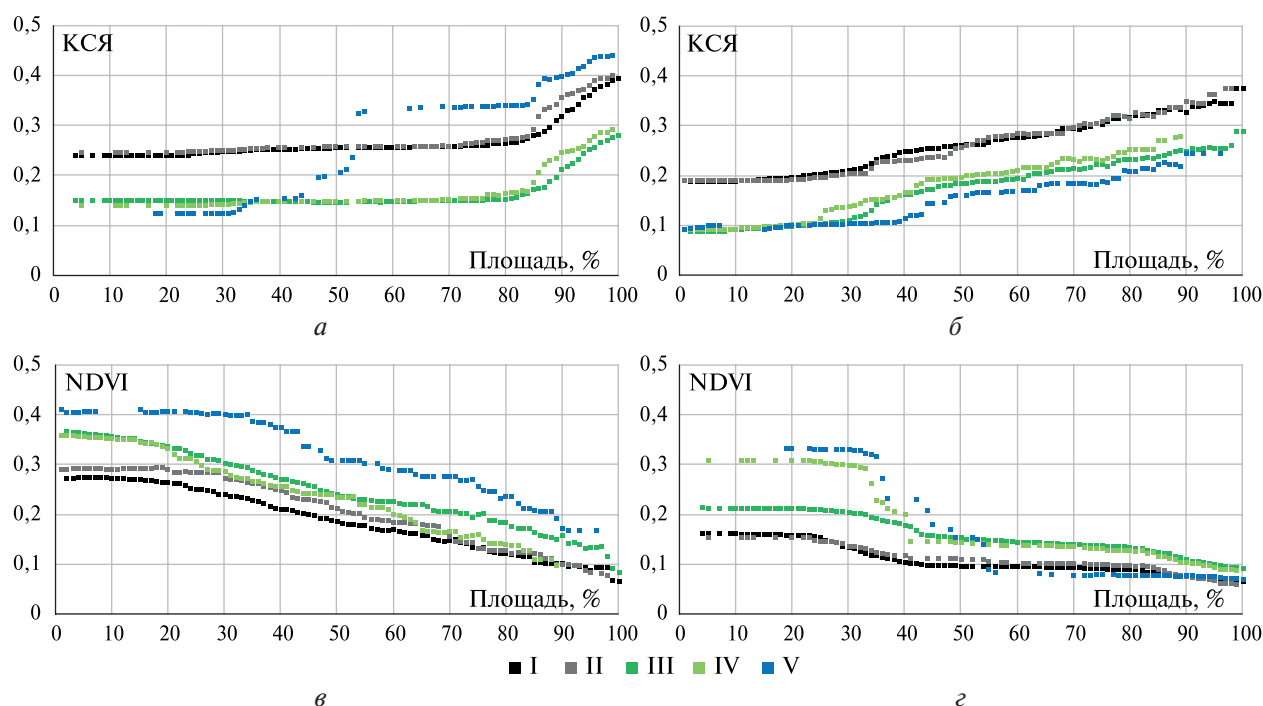


Рис. 4. Значения 5-го перцентиля максимальных и минимальных КСА красного диапазона (а, б) и 95-го перцентиля максимальных и минимальных NDVI (в, г) для разных порогов максимальных (а, в) и минимальных (б, г) площадей открытых песков в пикселе (I — одномоментные данные Sentinel-2 разрешения 10 м, II — одномоментные данные Sentinel-2 разрешения 20 м, III — трёхмесячные изображения Sentinel-2 разрешения 10 м, IV — трёхмесячные изображения Sentinel-2 разрешения 20 м, V — одномоментные изображения Landsat-8, -9)

В Волгоградской области в Арчединско-Донских песках при большей точности производителя при выделении песков (97 %) выросла и доля ложных определений (5 %), оставаясь на удовлетворительном уровне. При этом полнота выделения пикселей с покрытием песками менее 25 % снизилась до 82 % с долей ложных детекций 17 %. Это связано с большими значениями КСА красного диапазона, характерными для песков придонских песчаных массивов при той же их площади в пикселе. Отличия могут быть обусловлены как разным минералогическим и гранулометрическим составом песков речных террас Дона и перевеянных золотых песков Терско-Кумской низменности, так и несоответствиями растительного покрова. Для Терско-Кумской низменности характерно доминирование эфемероидов и сорных однолетников на песках, в то время как на участке аэросъёмки в Арчединско-Донских песках обильно представлены дерновинные злаки и кустарник можжевельник казацкий. Таким образом, предложенные в работе пороговые значения для минимальных и максимальных величин КСА и NDVI для выделения пикселей, большая часть которых занята открытыми песками, могут быть рекомендованы для юго-востока европейской части России. Пороговые значения КСА и NDVI для выделения пикселей, в которых менее 25 % площади заняты песками, рекомендуются для Северо-Западного Прикаспия, а для других территорий может потребоваться их коррекция.

Картографирование сезонной динамики открытых песков и дефлированных территорий в Ногайской степи в 2023 г.

На основе предложенного подхода была сформирована обучающая выборка для Ногайской степи в пределах Республики Дагестан (рис. 5), с помощью которой идентифицированы открытые пески и дефлированные территории по трёхмесячным композитным изображениям Sentinel-2 разрешения 10 м на весну, лето и осень 2023 г. Применялся метод гистограммного градиентного бустинга, в качестве признаков использовались значения КСЯ в ближнем инфракрасном, красном, зелёном, голубом диапазонах спектра и NDVI. Наибольшую значимость при классификации вносят КСЯ видимого диапазона (особенно в красном канале) и NDVI. Коэффициент спектральной яркости ближнего инфракрасного диапазона не вносит существенного вклада в разделение открытых песков и участков с растительным покровом, что подтверждается коэффициентами корреляции (табл. 1).

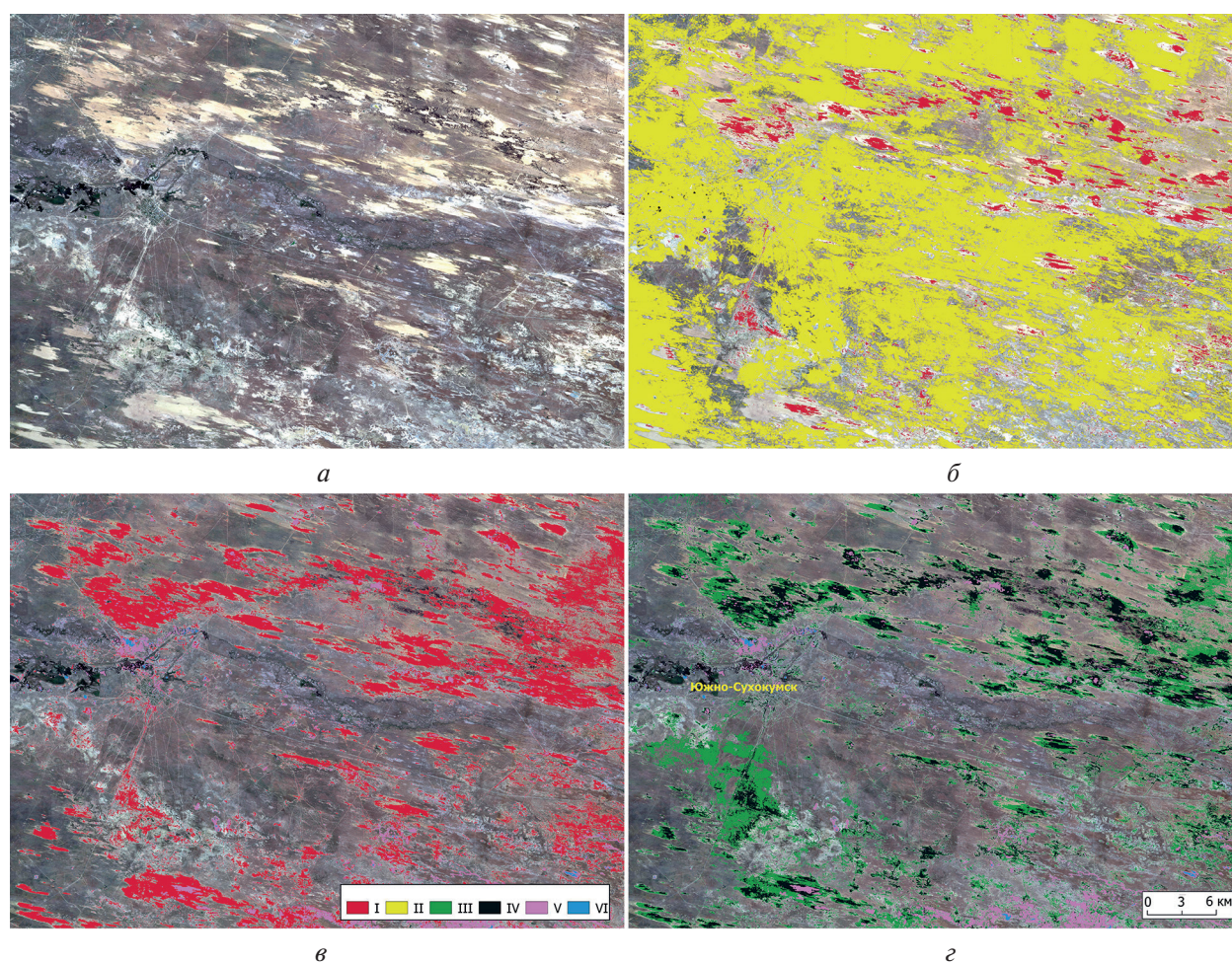


Рис. 5. Пример картографирования открытых песков и дефлированных территорий в окрестностях пос. Южно-Сухокумск весной 2023 г.: а — трёхмесячное композитное спутниковое изображение на весну 2023 г.; б — опорная выборка; в — результат классификации; г — результат определения максимальной и минимальной площади открытых песков (I — открытые пески и дефлированные территории; II — участки, где не было фиксации открытых песков; III, IV — максимальная и минимальная площадь дефлированных территорий соответственно; V — солончаки; VI — водоёмы)

Площадь лишённых растительного покрова земель весной составила 81,6 тыс. га (14,3 % территории исследования), снизившись к лету и осени до 52,2 тыс. га (9,2 %) и 48,7 тыс. га (8,6 %) соответственно на 36 и 40 %. Площадь стабильных открытых песков и дефлированных территорий, на которых в течение всего года не было растительности, составила 30,7 тыс. га

(5,4 % территории исследования). Максимальная площадь дефлированных территорий, где открытые пески были зафиксированы не менее одного раза в течение вегетационного сезона, равна 100,6 тыс. га (17,7 % территории исследования). Эти данные достаточно точно согласуются с полученными ранее на основе экспертных порогов NDVI и КСЯ красного диапазона по спутниковым изображениям Landsat: 54,2 тыс. га (9,5 % территории исследований) в начале сентября и 90,8 тыс. га (16,0 %) в середине апреля (Шинкаренко и др., 2024). Полученная площадь стабильных ядер дефляции также соответствует более ранним результатам на основе контролируемой классификации ежемесячных композитных изображений — 30,1 тыс. га (5,3 %) на 2022 г., а максимальная охваченная дефляцией площадь значительно сократилась с 173 тыс. га (30,4 % территории) (Биарсланов и др., 2023) до 100 тыс. га (18 % территории) на 2022 г. Снижение площадей открытых песков и дефлированных территорий, связанное с благоприятными гидротермическими условиями в 2023 г., наблюдалось не только в Ногайской степи, но и на всей территории Северо-Западного Прикаспия (Дорошенко, 2024; Шинкаренко и др., 2024).

Заключение

В результате исследования предложен эффективный метод формирования опорной выборки для последующей классификации открытых песков и дефлированных территорий на основе пороговых значений максимальных и минимальных КСЯ и ВИ с использованием композитных спутниковых изображений и методов машинного обучения. Проверка полученных пороговых значений за пределами основного региона проведения исследований по данным другого года продемонстрировала достаточно высокую точность, поэтому результаты могут быть рекомендованы для применения в Северо-Западном Прикаспии. Для других территорий и спутниковых данных может быть необходима коррекция пороговых значений КСЯ и ВИ.

Предложенный подход на основе использования пороговых значений даёт возможность в автоматическом режиме формировать опорные выборки, исключая трудоёмкие процедуры. За счёт этого возможно построение карт сезонных изменений площадей открытых песков и дефлированных территорий разного временного разрешения. Полученные результаты картографирования лишённых растительного покрова участков достаточно точно согласуются с данными на основе контролируемой классификации и подбора пороговых значений с учётом экспертной оценки.

Перспективным направлением развития методов картографирования открытых песков и дефлированных территорий может быть калибровка в соответствии с полученными картами данных более низкого пространственного разрешения, но более высокого временного, например, MODIS. Это откроет возможность более оперативного картографирования изменений площадей подверженных дефляции земель, а также формирования долговременного архива карт открытых песков с 2001 г.

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) с использованием сервиса «Вега-Science» и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг», наземные исследования выполнялись в рамках НИР ДФИЦ РАН «Оценка биоразнообразия и динамика компонентов наземных экосистем аридных ландшафтов восточной части Кавказа» (Регистрационный номер темы 125020501449-5).

Литература

1. Биарсланов А. Б., Шинкаренко С. С., Гаджиев И. Р. Картографирование и анализ сезонной динамики площадей опустынивания на севере Дагестана по ежемесячным композитам Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 160–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-160-175.

2. Гасанова З. У., Джалалова М. И., Загидова Р. М., Муратчаева П. М.-С., Желновакова В. А. Почвенное разнообразие и продуктивность растительных сообществ Западного Прикаспия // Тр. Ин-та географии Дагестанского науч. центра РАН. 2014. № 63. С. 70–72.
3. Дорошенко В. В. Оценка ежемесячной динамики площадей открытых песков на востоке Ставропольского края в 2023 г. // Геодезия и картография. 2024. Т. 85. № 4. С. 10–19. DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1006-4-10-19.
4. Дорошенко В. В., Мелихова А. В. Многолетняя динамика площадей открытых песков в Астраханском Заволжье по данным дистанционного зондирования // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высш. проф. образование. 2024. № 1(73). С. 135–143. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-14.
5. Кашицкий А. В., Бурцев М. А., Прошин А. А. Технология создания безоблачных композитных изображений по данным спутников серии Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 76–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
6. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
7. Полтарин В. С., Шинкаренко С. С. Сравнительный анализ методов машинного обучения при картографировании открытых песков и дефлированных пастбищ по спутниковым данным Sentinel-2 // Изв. высш. учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2024. Т. 68. № 4. С. 17–28. DOI: 10.30533/GiA-2024-028.
8. Титкова Т. Б., Золотокрылин А. Н. Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 130–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.
9. Шинкаренко С. С. Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 192–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.
10. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Последствия пыльных бурь на юге европейской части России в сентябре – октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 270–275. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-270-275.
11. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Спутниковые наблюдения пыльных бурь на юге России в 2022 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 293–300. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-293-300.
12. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Картографирование соровых понижений и солончаков в Северном Прикаспии на основе многолетних данных Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 153–165. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165.
13. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Анализ взаимосвязи структурных и спектрально-отражательных характеристик растительности аридных пастбищных ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 171–187. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187.
14. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Биарсланов А. Б. Изменения площадей открытых песков и дефлированных пастбищ на юго-востоке европейской части России в 2023 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 321–330. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-321-330.
15. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. 1988. V. 25. No. 3. P. 295–309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
16. Huete A., Didan K., Miura T. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 83. No. 1–2. P. 195–213. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
17. Kimura R., Liu J., Ganzorig U., Moriyama M. Development of a simple observation system to monitor regional wind erosion // Remote Sensing. 2024. V. 16. No. 17. Article 3331. DOI: 10.3390/rs16173331.
18. Kulik K. N., Rulev A. S., Yuferev V. G. Geoinformation analysis of desertification dynamics in the territory of Astrakhan oblast // Arid Ecosystems. 2015. V. 5. No. 3. P. 134–141. DOI: 10.1134/S2079096115030087.
19. Kulik K. N., Petrov V. I., Rulev A. S. et al. On the 30th anniversary of the “General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures” // Arid Ecosystems. 2018. V. 8. No. 1. P. 1–6. DOI: 10.1134/S2079096118010067.
20. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G. et al. Geoinformational analysis of desertification of the Northwestern Caspian // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. No. 2. P. 98–105. DOI: 10.1134/S2079096120020080.

21. *Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al.* Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
22. *Marzouki A., Dridri A.* Normalized Difference Enhanced Sand Index for desert sand dunes detection using Sentinel-2 and Landsat 8 OLI data, application to the north of Figuig, Morocco // *J. Arid Environments*. 2022. V. 198. Article 104693. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2021.104693.
23. *Qi J., Chehboinu A., Huete A.R. et al.* A modified soil adjusted vegetation index // *Remote Sensing of Environment*. 1994. V. 48. No. 2. P. 119–126. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.
24. *Sahar A.A., Rasheed M.J., Uaid D.A.A.-H., Jasim A.A.* Mapping sandy areas and their changes using remote sensing. A case study at north-east Al-Muthanna province, south of Iraq // *Revista de Teledetección*. 2021. V. 58. P. 39–52. DOI: 10.4995/raet.2021.13622.
25. *Secu C.V., Stoleriu C.C., Lesenciuc C.D., Ursu A.* Normalized Sand Index for identification of bare sand areas in temperate climates using Landsat images, application to the south of Romania // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 15. Article 3802. DOI: 10.3390/rs14153802.
26. *Shinkarenko S.S., Vypriyskiy A.A., Vasilchenko A.A., Berdengalieva A.N.* Analysis of anthropogenic influence on desertification processes in the Northern Caspian Region according to satellite data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023. V. 59. No. 9. P. 1115–1125. DOI: 10.1134/s0001433823090177.
27. *Xu D., Kang X., Qiu D. et al.* Quantitative assessment of desertification using Landsat data on a regional scale — A case study in the Ordos Plateau, China // *Sensors*. 2009. V. 9. No. 3. P. 1738–1753. DOI: 10.3390/s90301738.
28. *Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Sinelnikova K.P.* Spectral characteristics of desertified black-earth pastures // *Arid Ecosystems*. 2022. V. 12. No. 1. P. 54–60. DOI: 10.1134/S2079096122010152.
29. *Yuferev V.G., Silova V.A., Tkachenko N.A.* Remote monitoring of desertification in Kalmykia // *Arid Ecosystems*. 2023. V. 13. No. 1. P. 39–44. DOI: 10.1134/S2079096123010171.
30. *Zolotokrylin A.N., Titkova T.B.* A new approach to the monitoring of desertification centers // *Arid Ecosystems*. 2011. V. 1. No. 3. P. 125–140. DOI: 10.1134/S2079096111030127.

A method of mapping seasonal dynamics of open sand areas and deflated territories based on high-resolution satellite data and machine learning

S. S. Shinkarenko¹, S. A. Bartalev¹, A. B. Biarslanov², V. S. Poltarin¹

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

² *Daghestan Federal Research Centre RAS, Makhachkala 367000, Russia*

The increase in the areas of open sands and deflated territories in recent years has become a significant issue in the southeastern part of the European territory of Russia. Degradation of vegetation cover leads to intensification of deflation processes, culminating in catastrophic dust storms, which result in an even greater expansion of open sand areas. In this context, satellite monitoring of seasonal and long-term changes in deflated areas devoid of vegetation cover is highly relevant. Automated classification methods for satellite images necessitate a labor-intensive procedure for creating reference samples for each date, whereas expert interpretation is characterized by even greater labor costs. A potential solution may involve the use of universal expert threshold values for the maximum and minimum values of vegetation indices and spectral brightness coefficients. This study proposes an approach for forming reference samples based on expert thresholds, which has been substantiated using aerial imagery obtained from unmanned aerial vehicles. It was established that the spectral brightness coefficient in the red range and the Normalized Difference Vegetation Index exhibit the closest correlation with the proportion of open sand area within a pixel. The proposed approach enables generation of maps of open sands and deflated territories at least three times a year, on the basis of three-month composite images from Sentinel-2 with a spatial resolution of 10 meters. The verification of the results demonstrated the applicability of the method for mapping seasonal dynamics of open sand areas and deflated territories in the Northwestern Caspian region.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing, desertification, deflation, boosting

Accepted: 05.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-207-221

References

1. Biarslanov A. B., Shinkarenko S. S., Gadzhiev I. R., Mapping and analysis of desertification areas seasonal dynamics in the north of Dagestan based on Sentinel-2 monthly composites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 1, pp. 160–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-160-175.
2. Gasanova Z. U., Dzhalalova M. I., Zagidova R. M., Muratchaeva P. M.-S., Zhelnovakova V. A., Soil diversity and productivity of plant communities of the Western Caspian region, *Trudy Instituta geologii Dagestanskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2014, No. 63, pp. 70–72 (in Russian).
3. Doroshenko V. V., Assessing the open sand areas monthly dynamics in the East of the Stavropol Krai in 2023, *Geodeziya i kartografiya*, 2024, V. 85, No. 4, pp. 10–19 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2024-1006-4-10-19.
4. Doroshenko V. V., Melikhova A. V., Long-term dynamics of open sand areas in the Astrakhan Volga region according to remote sensing data, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2024, No. 1(73), pp. 135–143 (in Russian), DOI: 10.32786/2071-9485-2024-01-14.
5. Kashnitskii A. V., Burtsev M. A., Proshin A. A., Technology to create cloud-free composites from Sentinel-2 satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 5, pp. 76–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
6. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
7. Poltarin V. S., Shinkarenko S. S., Comparative analysis of machine learning methods for mapping open sands and deflated grasslands using Sentinel-2 satellite data, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aehrofotos'emka*, 2024, V. 68, No. 4, pp. 17–28 (in Russian), DOI: 10.30533/GiA-2024-028.
8. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Monitoring of lands affected by desertification in the Republic of Kalmykia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 2, pp. 130–141 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.
9. Shinkarenko S. S., Changes in spectral reflectance characteristics of the Northern Caspian zonal landscapes under pyrogenic influence, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 3, pp. 192–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.
10. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Consequences of dust storms in the south of the European part of Russia in September–October 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 7, pp. 270–275 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-270-275.
11. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Satellite observations of dust storms in southern Russia in 2022, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 6, pp. 293–300 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-293-300.
12. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Mapping of sor depressions and solonchaks in the Northern Caspian region based on long-term Landsat data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 153–165 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-153-165.
13. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Analysis of the relationship between structural and spectral-reflective characteristics of vegetation in arid grassland landscapes, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 171–187 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187.
14. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Biarslanov A. B., Changes in the areas of open sands and deflated pastures in the southeastern part of European Russia in 2023, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 321–330 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-321-330.
15. Huete A. R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sensing of Environment*, 1988, V. 25, No. 3, pp. 295–309, DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
16. Huete A., Didan K., Miura T. et al., Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 83, No. 1–2, pp. 195–213, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

17. Kimura R., Liu J., Ganzorig U., Moriyama M., Development of a simple observation system to monitor regional wind erosion, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, No. 17, Article 3331, DOI: 10.3390/rs16173331.
18. Kulik K. N., Rulev A. S., Yuferev V. G., Geoinformation analysis of desertification dynamics in the territory of Astrakhan oblast, *Arid Ecosystems*, 2015, V. 5, No. 3, pp. 134–141, DOI: 10.1134/S2079096115030087.
19. Kulik K. N., Petrov V. I., Rulev A. S. et al., On the 30th anniversary of the “General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures”, *Arid Ecosystems*, 2018, V. 8, No. 1, pp. 1–6, DOI: 10.1134/S2079096118010067.
20. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G. et al., Geoinformational analysis of desertification of the Northwestern Caspian, *Arid Ecosystems*, 2020, V. 10, No. 2, pp. 98–105, DOI: 10.1134/S2079096120020080.
21. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
22. Marzouki A., Dridri A., Normalized Difference Enhanced Sand Index for desert sand dunes detection using Sentinel-2 and Landsat 8 OLI data, application to the north of Figuig, Morocco, *J. Arid Environments*, 2022, V. 198, Article 104693, DOI: 10.1016/j.jaridenv.2021.104693.
23. Qi J., Chehboinu A., Huete A. R. et al., A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, 1994, V. 48, No. 2, pp. 119–126, DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.
24. Sahar A. A., Rasheed M. J., Uaid D. A. A.-H., Jasim A. A., Mapping sandy areas and their changes using remote sensing. A case study at north-east Al-Muthanna province, south of Iraq, *Revista de Teledetección*, 2021, V. 58, pp. 39–52, DOI: 10.4995/raet.2021.13622.
25. Secu C. V., Stoleriu C. C., Lesenciuc C. D., Ursu A., Normalized Sand Index for identification of bare sand areas in temperate climates using Landsat images, application to the south of Romania, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 15, Article 3802, DOI: 10.3390/rs14153802.
26. Shinkarenko S. S., Vypritskiy A. A., Vasilchenko A. A., Berdengalieva A. N., Analysis of anthropogenic influence on desertification processes in the Northern Caspian Region according to satellite data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, V. 59, No. 9, pp. 1115–1125, DOI: 10.1134/s0001433823090177.
27. Xu D., Kang X., Qiu D. et al., Quantitative assessment of desertification using Landsat data on a regional scale — A case study in the Ordos Plateau, China, *Sensors*, 2009, V. 9, No. 3, pp. 1738–1753, DOI: 10.3390/s90301738.
28. Yuferev V. G., Tkachenko N. A., Sinelnikova K. P., Spectral characteristics of desertified black-earth pastures, *Arid Ecosystems*, 2022, V. 12, No. 1, pp. 54–60, DOI: 10.1134/S2079096122010152.
29. Yuferev V. G., Silova V. A., Tkachenko N. A., Remote monitoring of desertification in Kalmykia, *Arid Ecosystems*, 2023, V. 13, No. 1, pp. 39–44, DOI: 10.1134/S2079096123010171.
30. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., A new approach to the monitoring of desertification centers, *Arid Ecosystems*, 2011, V. 1, No. 3, pp. 125–140, DOI: 10.1134/S2079096111030127.