

УДК 528.88

**АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ
ДЛЯ СПУТНИКОВОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ОТКРЫТЫХ ПЕСКОВ
И ДЕФЛИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО ПРИКАСПИЯ**

© 2025 г. С.С. Шинкаренко*, С.А. Барталев*, А.Б. Биарсланов**

**Институт космических исследований РАН*

Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

***Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН*

Россия, 367000, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 45. E-mail: axa73@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2025. После доработки 01.06.2025. Принята к публикации 01.07.2025.

Неблагоприятные гидротермические условия, нерациональное использование сельскохозяйственных угодий, в том числе чрезмерные пастбищные нагрузки, приводят к деградации степных и пустынных ландшафтов вплоть до полной утраты растительного покрова и верхних почвенных горизонтов. Это служит предпосылкой для интенсификации процессов дефляции и возникновения пыльных бурь, которые провоцируют дальнейший рост площади открытых (подвижных, развеваемых) песков и лишенных растительности территорий. Для мониторинга предпосылок и последствий интенсивных процессов дефляции широко применяются данные дистанционного зондирования Земли, в том числе спектральные вегетационные индексы, получаемые на их основе. Исследование направлено на оценку информативности 45 различных вегетационных индексов, рассчитываемых по спутниковым данным Sentinel-2 и Landsat, для картографирования открытых песков в Северо-Западном Прикаспии, где в последнее десятилетие интенсифицировались процессы деградации пастбищ на песчаных и супесчаных почвах. В результате сопоставления с данными аэросъемки на 3 тестовых участках общей площадью 23.1 га, которая выполнялась трижды в течение 2023 года, установлены наиболее информативные вегетационные индексы. Для данных Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м рекомендуются NDVI и коэффициенты спектральной яркости в видимом диапазоне, а для данных разрешения 20 м и Landsat – вегетационные индексы на основе видимого и коротковолнового инфракрасного диапазонов (NDSAI, BUI, NBR2, BAEI). Результаты исследования могут использоваться при картографировании открытых песков по спутниковым данным дистанционного зондирования Земли и разработке автоматизированных методов их классификации, в том числе на основе машинного обучения.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, дистанционное зондирование, опустынивание, дефляция, Дагестан, аридные ландшафты.

DOI: 10.24412/1993-3916-2025-3-42-54

EDN: GDXXFN

Нерациональное использование сельскохозяйственных земель на легких по гранулометрическому составу почвах может приводить к их деградации вплоть до полной утраты растительного покрова и верхних почвенных горизонтов в результате интенсификации процессов дефляции (Kulik et al., 2018). В России подобным негативным явлениям подвержены ландшафты пустынной и стеной зон в Северном Прикаспии (Астраханская область, Ставропольский край, Республики Дагестан, Калмыкия и Чеченская), где в результате превышения пастбищной емкости угодий в условиях неблагоприятных гидротермических условий в последнее десятилетие наблюдаются процессы деградации пастбищ, которые сопровождаются дефляцией и регулярными пыльными бурями (Шинкаренко, Барталев, 2022), из-за чего растет площадь развеваемых (подвижных, открытых) песков (Kulik et al., 2018; Yuferev et al., 2023). Постоянный мониторинг состояния почвенного и растительного покрова может способствовать своевременному обнаружению деградированных территорий, оценке их состояния и принятию необходимых мер по регулированию антропогенной нагрузки и реализации фитомелиоративных мероприятий по закреплению песков

(Kulik, Vlasenko, 2024). Для этих целей очень широко применяются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, включая получаемые на их основе спектральные вегетационные индексы (Виноградов, 1984; Трофимов, Яковлева, 2015; Титкова, Золотокрылин, 2022; Шинкаренко и др., 2024; Kulik et al., 2020; Xu et al., 2009; Yuferev et al., 2022; Zolotokrylin, Titkova, 2011). Регулярно пополняемые архивы однородных спутниковых данных различного пространственного и временного разрешения дают возможность анализировать сезонную и многолетнюю динамику состояния растительного и почвенного покрова, в т.ч. идентифицировать с использованием различных индикаторов земли, лишённые растительности в результате воздействия негативных факторов (Trofimov et al., 2015).

Площади массивов открытых песков в Северо-Западном Прикаспии характеризуются не только значительной межгодовой (Шинкаренко, 2019), но и сезонной динамичностью, связанной с пастбищными нагрузками, гидротермическими условиями и ветровым режимом (Биарсланов и др., 2023; Дорошенко, 2024). Поэтому при анализе многолетних изменений площадей открытых песков и дефлированных территорий важно учитывать их сезонную динамику, иначе анализ долговременной динамики может быть сопряжен со значительными неопределенностями (Дорошенко, Мелихова, 2024; Slavko et al., 2023; Yuferev et al., 2023). По этим причинам важно определять площади открытых песков несколько раз в течение вегетационного сезона (Дорошенко, 2024) с выделением устойчивых «очагов» дефляции, существующих в течение всего года или нескольких лет, и динамичных зон аккумуляции эолового материала (Биарсланов и др., 2023; Полтарин, Шинкаренко, 2024), меры по восстановлению которых отличаются (Kulik, Vlasenko, 2024).

Наиболее широко в исследованиях процессов деградации растительного покрова на основе данных ДЗЗ используются вегетационные индексы (ВИ), особенно NDVI (Wang et al., 2022), который характеризуется положительной корреляцией с вегетирующей фитомассой (Шинкаренко, Барталев, 2024). При этом большая часть работ по идентификации территорий без растительного покрова основывается на пороговых значениях ВИ или коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), определяемых по спутниковым данным (Delaney et al., 2025). Многие исследователи предлагают использовать пороговое значение $NDVI = 0.2$ для отделения деградированных земель, лишённых растительного покрова (Титкова, Золотокрылин, 2022; Kimura et al., 2024), в то время как эта величина должна корректироваться в зависимости от состояния растительности и конкретной спутниковой системы, выступающей в качестве источника данных ДЗЗ (Delaney et al., 2025). Разработано множество различных специализированных ВИ для картографирования открытых почв и песков на основе пороговых значений (Kebede et al., 2022; Marzouki et al., 2022; Nguen et al., 2021; Sahar et al., 2021; Secu et al., 2022), но ни для одного из них не существует универсальных величин порогов, которые могли бы применяться на любой территории в течение вегетационного сезона на основе различных источников данных ДЗЗ (Delaney et al., 2025). Также для большей части результатов, получаемых на основе пороговых значений ВИ и КСЯ, не применялась процедура верификации, поэтому степень их неопределенности неизвестна (Шинкаренко, 2019; Delaney et al., 2025; Kulik et al., 2015; Yuferev et al., 2023). Методы контролируемой классификации, в т.ч. на основе машинного обучения, позволяют получать результаты с достаточно высокой точностью, но как для картографирования, так и для проверки точности результатов требуется создание качественной опорной выборки. Одним из источников проверочных данных для результатов картографирования могут выступать материалы экспертного дешифрирования высокодетальных спутниковых изображений (Дорошенко, Мелихова, 2024), но их сбор сопряжен со значительными трудозатратами, поэтому ограничивается отдельными регионами (Дорошенко, 2024). Наземная верификация результатов еще более трудозатратна. Одним из возможных источников данных для проверки результатов картографирования открытых песков и настройки соответствующих алгоритмов классификации может выступать аэросъемка, в т.ч. с использованием беспилотных летательных аппаратов (Павлейчик, 2025). Сопоставление площадей открытых песков по данным аэросъемки, а также КСЯ и ВИ по спутниковым данным дает возможность определения наиболее информативных признаков для последующей классификации спутниковых изображений на основе различных автоматизированных алгоритмов (Полтарин, Шинкаренко, 2024; Delaney et al., 2025).

Таким образом, проблема определения наиболее информативных показателей при спутниковом картографировании сезонных и многолетних изменений площадей открытых песков и

дефлированных территорий достаточно актуальна. Цель исследования заключается в обосновании наиболее значимых индикаторов участков подвижных песков по спутниковым данным. Для этого решались следующие задачи:

- сбор опорных данных на основе аэросъемки беспилотным летательным аппаратом и наземных наблюдений в течение вегетационного сезона;
- расчет различных ВИ, предназначенных для анализа состояния растительного покрова или идентификации территорий без растительности, по спутниковым данным Sentinel-2 и Landsat 8/9;
- сопоставление доли пикселей, занятых открытыми песками со значениями КСЯ и ВИ с расчетом линейного коэффициента корреляции Пирсона и непараметрических ранговых коэффициентов корреляции Спирмена и тау Кендалла;
- определение ВИ и спектральных диапазонов с максимальными по модулю значениями коэффициентов корреляции.

Материалы и методы

Исследование основывается на сопоставлении площадей открытых песков по данным аэросъемки в пикселях спутниковых изображений Sentinel-2 пространственного разрешения 10 и 20 м, а также Landsat 8, 9 разрешения 30 м. Аэросъемка выполнялась беспилотным летательным аппаратом DJI Mavic Air в видимом диапазоне с высоты 100 м на территории Ногайского и Тарумовского районов Дагестана (рис. 1) 25-27 апреля, 26-28 июля и 25-27 октября 2023 г. (рис. 2). По материалам аэросъемки построены ортофотопланы пространственного разрешения 3.5 см (рис. 3). В работе использованы данные, полученные в пасмурную погоду в апреле и октябре и с минимальным значением зенитного угла солнца в июле на одних и тех же участках в течение года на общей площади 23.1 га. Выделение открытых песков по данным аэросъемки проводилось кластеризацией ортотрансформированных изображений с последующей группировкой соответствующих пескам кластеров на основе экспертной оценки.

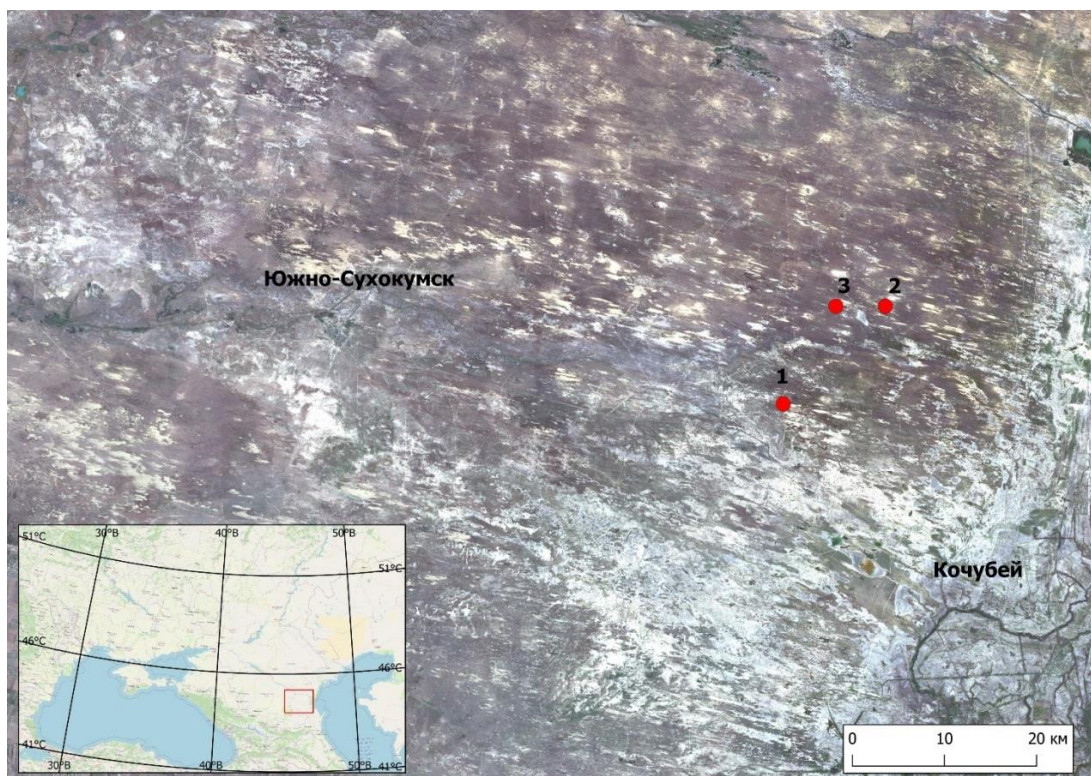


Рис. 1. Территория исследований, спутниковое изображение Sentinel-2 за октябрь 2023 г. Условные обозначения: 1-3 – тестовые участки.

Первый участок представляет собой деструктивно-аккумулятивную и аккумулятивную области в западной части крупного песчаного массива (рис. 3), общая площадь которого составляет около

АРИДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ, 2025, том 31, № 3 (104)

60 га при ширине до 400 м. Второй участок включает деструктивную область очага дефляции шириной около 30 м, вытянутого в направлении с юго-востока на северо-запад с окружающими сбитыми пастбищами на зональных светло-каштановых почвах легкого гранулометрического состава (Гасанова и др., 2014). Третий участок нерегулярно частично перекрывается подвижными песками, т.к. представлен сбитыми пастбищами на зональных почвах с аккумуляцией эолового материала, выдуваемого с сети грунтовых дорог и расположенного в 300 м на юго-восток песчаного массива. Таким образом, тестовые участки охватывают основные процессы эолового переноса в регионе.

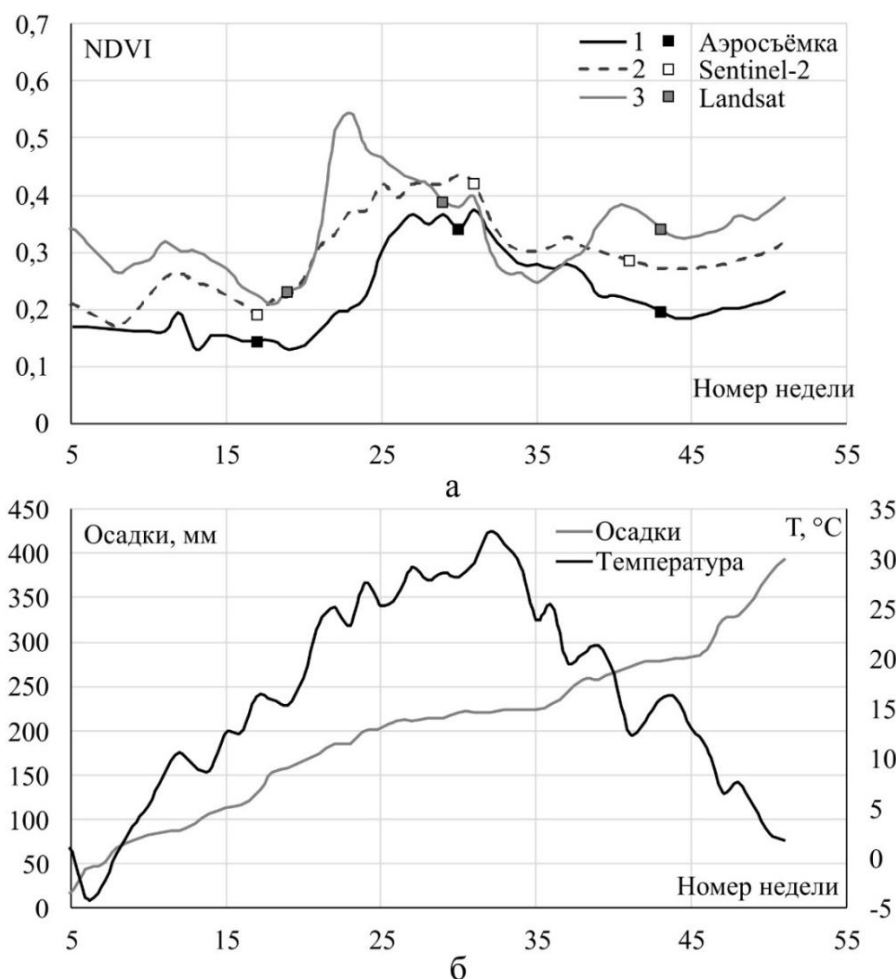


Рис. 2. а) Сезонный ход NDVI на тестовых участках с маркерами, обозначающими даты аэросъемки и спутниковых изображений, б) динамика средних температур и накопленные суммы осадков по данным системы «Вега-Science».

Спутниковые изображения второго уровня обработки, прошедшие процедуру коррекции атмосферных искажений, и метеоданные получены с использованием сервиса «Вега-Science» (Lourian et al., 2022) и ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). Даты использованных спутниковых данных ДЗЗ подбирались максимально близко к датам аэросъемки: 26 апреля, 30 июля, 8, 13 октября (Sentinel-2) и 9 мая, 20 июля, 25 октября (Landsat 8, 9; рис. 2). Для каждого пикселя спутниковых изображений была определена площадь открытых песков по данным аэросъемки на соответствующую дату, также анализировались одновременно данные на все даты. Всего проанализировано 2.3 тыс. пикселей Sentinel-2 разрешения 10 м, 0.56 тыс. пикселей Sentinel-2 разрешения 20 м и 0.25 тыс. – Landsat разрешения 30 м.

В работе анализировались 45 различных индексов, которые используются для оценки состояния растительности – NDVI, EVI (Huete et al., 2022), SAVI (Huete et al., 1988), MSAVI (Qi et al., 1994); идентификации открытых почв – GVI, NDESI, NDSAI, MNDBSI, NBR2; застроенных территорий –

VUI, NBAI, NBI; повреждений растительного покрова (Zhao et al., 2024). При этом 13 из них могут быть рассчитаны по данным Sentinel-2 разрешения 10 м, а остальные 32 используют коротковолновый инфракрасный диапазон, которому соответствуют данные Sentinel-2 разрешения 20 м. Описание использованных индексов приведено в литературных обзорах и оригинальных статьях (Delaney et al., 2025; Kebede et al., 2022; Marzouki et al., 2022; Nguen et al., 2021; Sahar et al., 2021; Secu et al., 2022). Список наиболее часто используемых индексов для картографирования различных участков без растительного покрова и упоминаемых в данном исследовании приведен в таблице 1. Расчет коэффициентов корреляции Пирсона, ранговой корреляции Спирмена и Кендалла (τ) осуществлялся с помощью модуля `scipy.stats` библиотеки SciPy языка программирования Python. Также применялся ансамблевый метод регрессии Random Forest, реализованный на языке Python, на основе которого была предпринята попытка определения доли открытых песков в пикселях спутниковых изображений с оценкой точности (коэффициента детерминации R^2 и среднеквадратического отклонения (СКО, RMSE)) и наиболее информативных признаков. Этот метод демонстрирует достаточно высокую точность при классификации участков без растительности по спутниковым данным ДЗЗ (Полтарин, Шинкаренко, 2024; Delaney et al., 2025). Обучение алгоритма при этом проводилось по 70% выборки, остальные 30% выборки не использовались при обучении, а применялись для оценки точности модели.

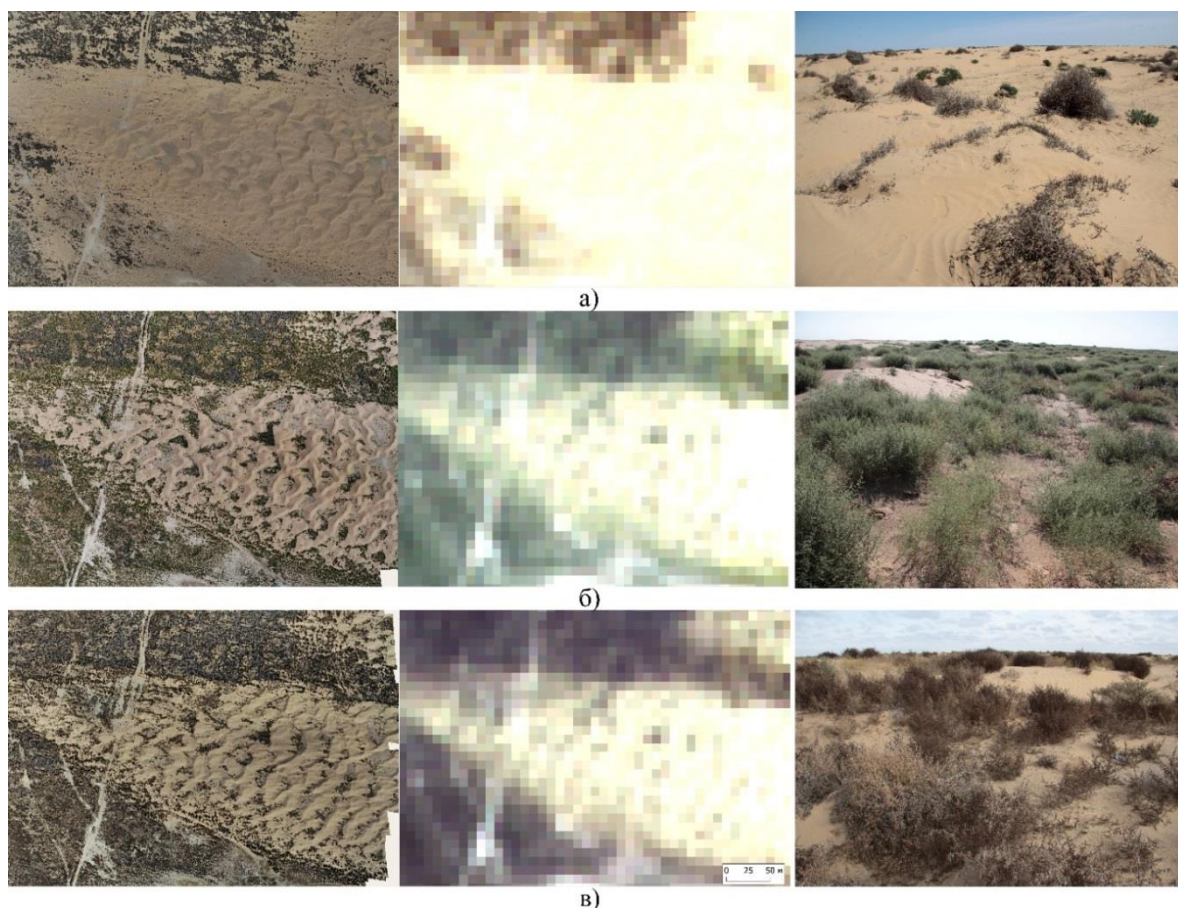


Рис. 3. Примеры аэросъемки, спутниковых изображений Sentinel-2 и наземных фотографий исследованного массива подвижных песков (первый тестовый полигон) в 2023 г.: а) апрель, б) июль, в) октябрь.

Результаты и обсуждение

Год исследований характеризовался нетипичными условиями увлажнения, годовая сумма осадков достигла 400 мм, что существенно выше, чем в предыдущие годы (Биарсланов, Шинкаренко, 2023). При этом значительная часть осадков выпала в конце весны и начале лета, что привело к бурному развитию однолетников. Сезонный ход кривой NDVI из-за этого в 2023 году

отличается от характерной для зональной растительности опустыненных степей и северных пустынь двухпиковой формы (Рулев и др., 2016). Первый (весенний) пик NDVI между 10 и 15 неделями связан с развитием эфемеров, эфемероидов и дерновинных злаков, второй пик обычно приходится на осенний период, что связано с польнями, галофитами и отрастанием злаков. В 2023 году отмечен летний пик NDVI, который был вызван вегетацией однолетних растений (рис. 2). По этим причинам площадь открытых песков в этот год была максимальной весной, достигнув минимума осенью (Дорошенко, 2024; Шинкаренко и др., 2024), в то время как обычно наибольшие площади отмечаются в конце лета – первой половине осени (Биарсланов и др., 2023; Дорошенко, Мелихова, 2024).

Табл. 1. Использованные в работе вегетационные индексы с высокой информативностью при картографировании участков без растительности.

Индекс	Формула
BAEI	$(Red+0.3)/(Green+SWIR1)$
BI	$(SWIR1+Red-NIR-Blue)/(SWIR1+Red+NIR+Blue)$
BI2	$Red+SWIR1-NIR$
BRBA	$Red/SWIR2$
Bsum	$Blue+Green+Red+NIR$
BUI	$NDSAI-NBR2$
EVI	$2.5*(NIR-Red)/(NIR+6*Red-7.5*Blue+1)$
GVI1	$Green-Blue$
GVI2	$Red-Green$
IBI	$(NDBI - (SAVI + MNDWI) / 2) / (NDBI + (SAVI + MNDWI) / 2)$
MNDBSI	$(SWIR1-Blue)/(SWIR1+Blue)-(NIR+Red-Blue)$
MNDWI	$(Green-SWIR2)/(Green+SWIR2)$
MSAVI	$(1/2)*(2(NIR+1)-\sqrt{(2*NIR+1)^2-8(NIR-Red)})$
NBAI	$(SWIR2-SWIR1/Green)/(SWIR2+SWIR1/Green)$
NBI	$Red * SWIR1 / NIR$
NBR2	$(SWIR1-SWIR2)/(SWIR1+SWIR2)$
NDESI	$NPCRI-NBR2$
NDSAI	$(SWIR1-Red)/(SWIR1+Red)$
NDSDI	$(Red-SWIR2)/(Red+SWIR2)$
NDSI	$(Green-SWIR1)/(Green+SWIR1)$
NDVI	$(NIR-Red)/(NIR+Red)$
NDVISI	$(Blue+Green+Red-NIR)/(Blue+Green+Red+NIR)$
NDWI	$(Green-NIR)/(Green+NIR)$
NPCRI	$(Red-Blue)/(Red+Blue)$
NSAI1	$(SWIR1^2-Green*NIR)/(SWIR1^2+Green*NIR)$
NSBI	$(Green-Blue)/(Green+Blue)$
PV	$NDVI+(NIR-Blue)/(NIR+Blue)$
PV+IR2	$NDVI+(NIR-SWIR2)/(NIR+SWIR2)$
RVI	NIR/Red
SAVI	$1.5*(NIR-Red)/(NIR+Red+0.5)$
SWI	$(NIR-SWIR1-SWIR2)/(NIR+SWIR1+SWIR2)$
TGSI	$(Red-Green)/(Red+Green+Blue)$
VNSIR	$1-((2*Red-Green-Blue)+3*(SWIR2-NIR))$

Примечания к таблице 1: Red, Blue, Green, NIR, SWIR – коэффициенты спектральной яркости в красном, голубом, зеленом, ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазонах спектра.

В апреле 2023 года почвенно-растительный покров исследованных песчаных массивов был представлен подвижными песками, деструктивными областями дефляции, откуда был вынесен золотый материал, и высохшей прошлогодней растительностью. В пределах песчаных массивов в это время активной вегетации не было. За пределами подвижных песков преобладали сообщества с доминированием уже закончившего вегетацию *Poa bulbosa* L., с участием *Alyssum turkestanicum* var. *desertorum* (Stapf) Botsch., *Erodium cicutarium* (L.) L'Hér., *Ranunculus oxyspermus* Willd. и всходами *Salsola tragus* L. В июле отмечалась активная вегетация сорных однолетних растений как на периферии песчаных массивов, так и внутри них. Доминирующим видом был *Salsola tragus* с участием на песках *Xanthium spinosum* L., *Agriophyllum pungens* (Vahl) Link ex A. Dietr., *Heliotropium europaeum* L., *Peganum harmala* L. В конце октября вегетация растительности на песках практически завершилась, поэтому растительный покров был представлен мортмассой указанных видов текущего и предыдущего годов. В соответствии с особенностями фитоценозов менялись и спектрально-отражательные характеристики поверхности, которые зависят не только от соотношения площадей открытых песков и растительности, но и от состояния последней (Шинкаренко, Барталев, 2024). Поэтому анализ взаимосвязи спектрального отклика поверхности и вегетационных индексов с долей открытых песков в пикселе проводился отдельно по сезонам с результирующей оценкой по всем датам.

В результате сопоставления площадей открытых песков в пикселях спутниковых изображений Sentinel-2 пространственного разрешения 10 и 20 м, Landsat 8 разрешения 30 м, значениях КСЯ в разных спектральных диапазонах и рассчитанных на их основе ВИ получены коэффициенты корреляции Пирсона, Спирмена и Кендалла (рис. 4; табл. 2), практически все из которых значимы ($p < 0.001$). Открытые пески характеризуются высоким альбедо (Yuferev et al., 2022; Zolotokrylin, Titkova, 2011), поэтому значения коэффициентов корреляции их площади и КСЯ спектральных каналов видимого диапазона высоки.

Для всех использованных спутниковых данных в весенний период нет существенных отличий во влиянии доли площади открытых песков на КСЯ в видимом диапазоне (тау Кендалла отличается до 0.02 для разных спектральных каналов). Летом сила связи КСЯ и площади открытых песков несколько снизилась, при этом летом и осенью существенно увеличивается информативность значений КСЯ в голубом диапазоне спектра по данным Sentinel-2, в то время как по данным Landsat в течение всего года коэффициенты корреляции КСЯ видимого диапазона практически не отличаются между собой (рис. 4).

По данным Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м кроме КСЯ видимого диапазона достаточно высокой положительной связью с площадями открытых песков в пикселе весной характеризуется GVI1, рассчитываемый как разность КСЯ в зеленом и голубом диапазонах спектра, наиболее сильная отрицательная связь отмечена у NDVI и RVI. В летний период кроме перечисленных выше показателей достаточно информативными становятся индексы PV, NDVISI, а осенью – GVI2. Таким образом, наиболее тесная связь площади открытых песков в пикселях Sentinel-2 разрешения 10 м отмечена с NDVI и КСЯ в видимом диапазоне.

По данным Sentinel-2 разрешения 20 м, включая коротковолновый инфракрасный диапазон, в весенний период наибольшие положительные коэффициенты корреляции с площадью открытых песков имеют КСЯ видимого диапазона, индексы BUI, BAEI, NBAI, предназначенные для картографирования застройки (Kebede et al., 2022), а также GVI1 и NDSI. Наиболее сильная отрицательная связь характерна для NDSAI, MNDBSI и NDVI. Коэффициенты корреляции площади открытых песков с соответствующими ВИ с использованием данных коротковолнового диапазона пространственного разрешения 20 м выше, чем по данным разрешения 10 м, что может компенсировать снижение детальности спутниковых изображений.

Результаты сопоставления площади открытых песков с ВИ и КСЯ пикселей Landsat пространственного разрешения 30 м в целом соответствуют полученным для данных Sentinel-2 разрешения 20 м при анализе по отдельными датами спутниковых изображений. Среди наиболее информативных ВИ также находятся NDSAI и BUI. Кроме них в отдельные сезоны могут быть рекомендованы NBR2, NDVI и NDESI. КСЯ отдельных каналов по данным Landsat имеют существенно меньшую силу связи с площадью открытых песков относительно ВИ, если сравнивать с Sentinel-2. При этом все видимые диапазоны спектра Landsat имеют примерно одинаковые

коэффициенты корреляции с величиной площади открытых песков. При обобщенной оценке по всем датам коэффициенты корреляции КСЯ и ВИ по Landsat меньше по модулю, чем для Sentinel-2. Это может быть связано с самой низкой детальностью этих данных из всех проанализированных, из-за чего неоднородность почвенно-растительного покрова в пикселях спутниковых изображений Landsat в течение года меняется сильнее.

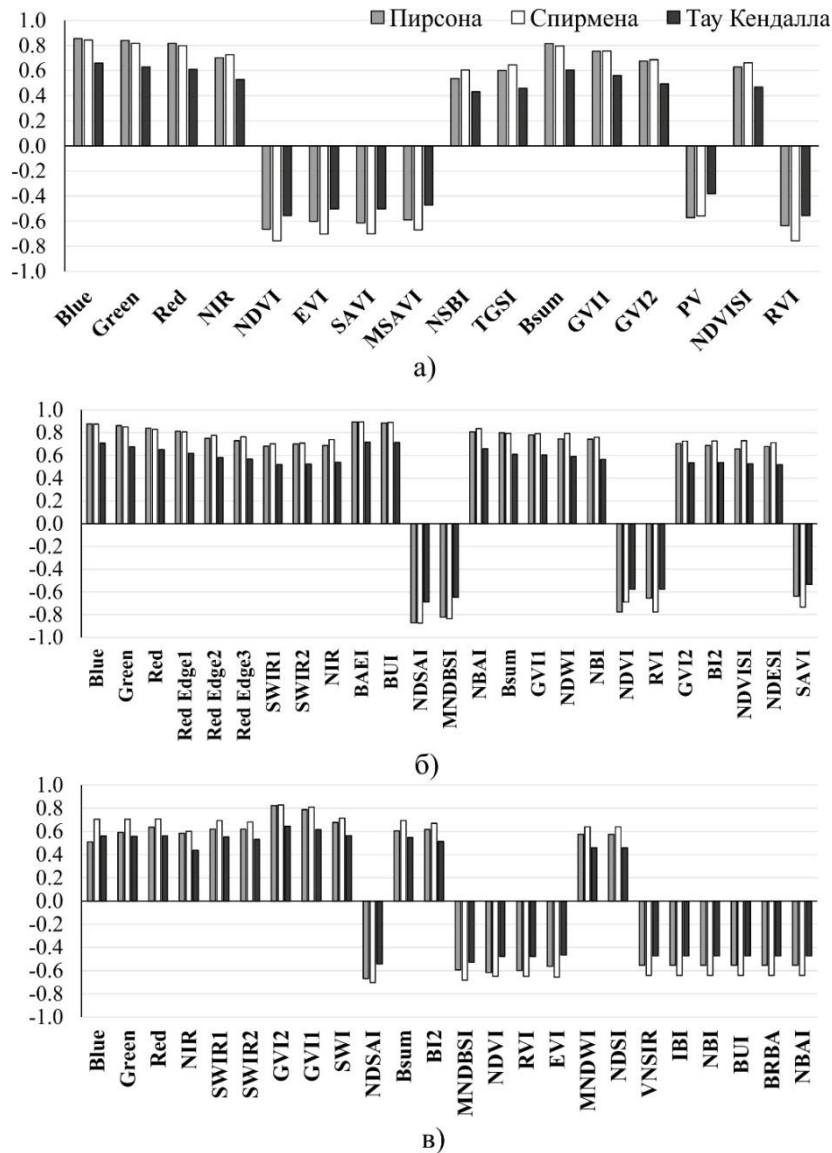


Рис. 4. Коэффициенты корреляции КСЯ, вегетационных индексов и доли площади открытых песков в пикселях Sentinel-2 разрешения 10 м (а), 20 м (б) и Landsat разрешения 30 м (в) по всем датам аэросъемки.

В результате применения метода непараметрической регрессии Random Forest получены оценки точности определения площади открытых песков в пикселях спутниковых изображений на основе КСЯ всех спектральных диапазонов и использованных ВИ. Для всех данных значения R^2 превысили 0.8 (рис. 5), а СКО составляет не более 12%, что соответствует достаточно высокой точности регрессии. При этом и данные КСЯ, и представленные выше ВИ обладают высокой информативностью и взаимозаменяемостью при использовании этого метода регрессии. Например, исключение из признаков ВИ и КСЯ, указанных в таблице 2, не приводит к существенному снижению точности предсказания площади открытых песков, поскольку это не единственные показатели с достаточно высокой корреляцией (рис. 4).

Табл. 2. Наиболее информативные показатели при определении доли открытых песков в пикселях спутниковых изображений (числитель), максимальные или минимальные значения коэффициентов корреляции (знаменатель).

Корреляция	Период	Вегетационные индексы и спектральные каналы / значения коэффициентов корреляции					
		Максимальные значения коэффициентов корреляции			Минимальные значения коэффициентов корреляции		
		Sentinel-2, 10 м	Sentinel-2, 20 м	Landsat, 30 м	Sentinel-2, 10 м	Sentinel-2, 20 м	Landsat, 30 м
Пирсона	Весна	Green 0.89	NDSI 0.96	BUI 0.96	NDVI -0.91	NDSAI -0.96	NDSAI -0.95
	Лето	Blue 0.84	BUI 0.89	NBAI 0.84	PV -0.77	NDSAI -0.88	NBR2 -0.84
	Осень	Blue 0.85	NDSI 0.90	BI2 0.88	NDVI -0.8	NDSAI -0.88	PV -0.85
	Все даты	Blue 0.85	BAEI 0.89	GVI2 0.82	NDVI -0.66	NDSAI -0.87	NDSAI -0.67
Спирмена	Весна	Green 0.90	BUI 0.94	NDESI 0.94	NDVI -0.85	NDSAI -0.93	NBR2 -0.94
	Лето	Blue 0.81	BUI 0.89	BUI 0.81	PV -0.73	NDSAI -0.88	NBR2 -0.81
	Осень	Blue 0.85	NDSI 0.90	NBI 0.88	NDVI -0.81	NDSAI -0.89	NDVI -0.87
	Все даты	Blue 0.84	BAEI 0.89	GVI2 0.83	NDVI -0.76	NDSAI -0.87	NDSAI -0.7
Тау Кендалла	Весна	Green 0.72	BUI 0.80	NDESI 0.8	NDVI -0.68	NDSAI -0.79	NBR2 -0.79
	Лето	Blue 0.62	BUI 0.72	SWI 0.63	PV -0.55	NDSAI -0.70	NBR2 -0.63
	Осень	Blue 0.66	BAEI 0.73	NBI 0.71	NDVI -0.61	NDSAI -0.72	NDVI -0.68
	Все даты	Blue 0.66	BAEI 0.72	GVI2 0.64	NDVI -0.56	NDSAI -0.69	NDSAI -0.54

Исследованные ВИ в большинстве случаев не дают возможности разделения открытых песков и солончаков (особенно корковых), распространенных в Северном Прикаспии, из-за чего возможно их перепутывание из-за отсутствия растительного покрова и высокой яркости выступающей на поверхности соли (Полтарин, Шинкаренко, 2024). Решением проблемы может быть предварительное отдельное картографирование сорных понижений и солончаков на основе многолетних спутниковых данных ДЗЗ. Подобная карта сорных понижений и солончаков уже разработана для Северного Прикаспия (Шинкаренко, Барталев, 2023).

Таким образом, можно рекомендовать для картографирования открытых песков КСЯ видимого диапазона и NDVI по данным Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м, а для данных Sentinel-2 разрешения 20 и Landsat рекомендуются ВИ, основанные на КСЯ видимого и инфракрасного коротковолнового диапазона. В весенний период сила связи с площадями открытых песков выше, чем летом и осенью, для всех исследованных источников данных ДЗЗ и получаемых на их основе КСЯ и ВИ. Метод регрессии Random Forest также демонстрирует весной большую точность. Это может быть связано с активной вегетацией растительности в летний период и значительной мортмассой осенью 2023 г., в то время как весной растительный покров был более однороден. Состояние растительного покрова, маскирующего поверхность открытых песков, вносит

существенную неопределенность при их картографировании, из-за чего возрастает роль данных в коротковолновой области спектра. Соответственно, ВИ, использующие этот диапазон, являются более информативными.

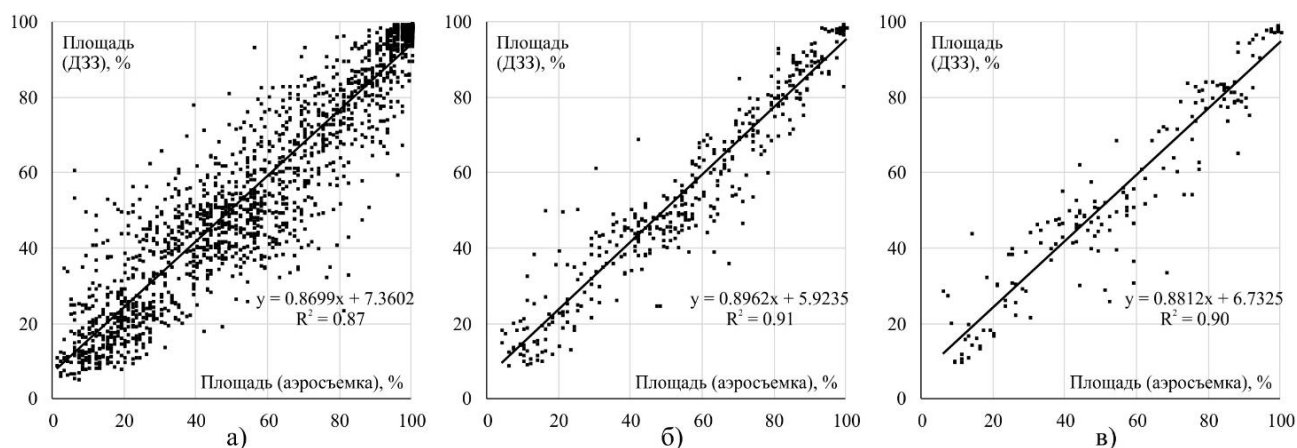


Рис. 5. Сопоставление результатов применения регрессии Random Forest для определения площади открытых песков в пикселях спутниковых изображений с проверочными данными аэросъемки по всем датам: а – Sentinel-2 разрешения 10 м, б – Sentinel-2 разрешения 20 м, в – Landsat.

По данным В. Delaney с соавторами (2025), самым распространенным индексом для идентификации участков без растительности является NDVI (примерно 40% всех исследований), еще около четверти исследований по картографированию открытых почв и песков используют ВИ GVI1 или GVI2. Индекс NDSAI, рассчитываемый как нормализованная разность КСЯ коротковолнового диапазона 1.6 мкм и красного диапазона, по результатам анализа характеризуется высокими значениями коэффициентов корреляции, также его информативность подтверждена алгоритмом Random Forest. В сравнительном анализе различных ВИ для картографирования открытых песков в Иране этот ВИ также показал наибольшую точность, продемонстрировав полноту выделения песков 82.1%. При этом некоторые авторы отмечают более высокие значения NDSAI для песчаных почв (Sahar et al., 2021), в то время как в данном исследовании связь между этим ВИ и долей площади открытых песков отрицательна.

Также для определения доли площади открытых песков в пикселях спутниковых изображений достаточно высокую информативность продемонстрировали индексы для идентификации застроенных территорий: BAEI, BUI, NBAI и NBI (Kebede et al., 2022). Они рассчитываются по КСЯ видимого и коротковолнового инфракрасного диапазонов, ВИ на основе которых характеризуются высокой эффективностью при картографировании открытых песков. При этом индекс MBI, который предназначен для разделения застройки и открытых почв (Nguen et al., 2021), не показал в данном исследовании преимуществ перед остальными.

Выводы

Аэросъемка служит достаточно надежным источником данных для обоснования информативных вегетационных индексов при картографировании открытых песков, а также для формирования набора верификационных данных. Сочетание наземных наблюдений и аэросъемки позволило создать выборку, учитывающую разные проявления дефляционных процессов, и охватить различные состояния растительного покрова на песчаных массивах и окружающих их зональных почвах.

Проведенные исследования показали достаточно высокую информативность вегетационных индексов, основанных на КСЯ видимого и коротковолнового инфракрасного диапазонов, при картографировании открытых песков в Северо-Западном Прикаспии. В зависимости от используемых спутниковых данных и состояния растительного покрова могут быть рекомендованы разные ВИ и спектральные диапазоны.

Для спутниковых данных Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м, которые представлены КСЯ видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, схожую информативность имеют КСЯ всех

видимых спектральных каналов, при этом весной несколько предпочтительней зеленый, летом и осенью – голубой, а наиболее универсальными являются голубой и красный. Среди ВИ разрешения 10 м лучшие результаты продемонстрировали NDVI и PV. Наиболее оптимальным сочетанием будет применение данных КСЯ красного диапазона и NDVI, который рассчитывается с использованием КСЯ красного и ближнего инфракрасного диапазонов спектра. Сила связи КСЯ красного канала и площади открытых песков практически не отличается от других видимых диапазонов спектра, но, т.к. красный используется для расчета NDVI, его применение предпочтительно.

Для спутниковых изображений Sentinel-2 пространственного разрешения 20 м, по которым доступны данные коротковолнового инфракрасного диапазона спектра, наиболее информативны ВИ, рассчитываемые с их использованием. Например, это специально разработанный для идентификации песчаных почв NDSAI, а также индексы BAEI и BUI, применяемые при картографировании застроенных территорий. Эти индексы демонстрируют более сильную связь с площадями открытых песков в пикселях по сравнению с КСЯ отдельных спектральных каналов и NDVI, но их применение влечет снижение пространственного разрешения.

При использовании данных Landsat 8, 9 рекомендуются ВИ GVI1, GVI2, NBR2 и NDSAI. Из-за более низкого пространственного разрешения спутниковых изображений Landsat сила связи ВИ и площади открытых песков ниже по сравнению с Sentinel-2. Это связано с ростом неоднородности почвенно-растительного покрова в пикселях спутниковых изображений более низкого пространственного разрешения.

Состояние растительности может вносить существенную неопределенность при картографировании открытых песков по данным ДЗЗ. В этом исследовании наиболее тесная связь ВИ отмечена весной – в период, когда эфемеры и эфемероиды уже закончили вегетацию, виды-эдикаторы были угнетены из-за неблагоприятных гидротермических условий весны и стравливания домашним скотом, а однолетники еще не начали активную вегетацию. Летом в период наибольшей фитомассы однолетников и осенью из-за накопления мортмассы сила связи ВИ и площади открытых песков существенно снизилась. Таким образом, не существует универсальных пороговых значений для вегетационных индексов при картографировании открытых песков. Но выявленные наиболее информативные показатели могут быть рекомендованы к применению при картографировании открытых песков и дефлированных территорий в качестве признаков и основы для составления обучающей выборки для различных методов машинного обучения, например, ансамблевого алгоритма Random Forest и других.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы Института космических исследований РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) с использованием сервиса «Vega-Science» и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг»; наземные исследования выполнялись в рамках НИР Дагестанского федерального исследовательского центра РАН «Оценка биоразнообразия и динамика компонентов наземных экосистем аридных ландшафтов восточной части Кавказа» (тема № 125020501449-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биарсланов А.Б., Шинкаренко С.С., Гаджиев И.Р. 2023. Картографирование и анализ сезонной динамики площадей опустынивания на севере Дагестана по ежемесячным композитам Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 20. № 1. С. 160-175.
- Виноградов Б.В. 1984. Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука. С. 320.
- Гасанова З.У., Джалалова М.И., Загидова Р.М., Муратчаева П.М.С., Желновакова В.А. 2014. Почвенное разнообразие и продуктивность растительных сообществ Западного Прикаспия // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. № 63. С. 70-72.
- Дорошенко В.В. 2024. Оценка ежемесячной динамики площадей открытых песков на востоке Ставропольского края в 2023 г // Геодезия и картография. Т. 85. № 4. С. 10-19.
- Дорошенко В.В., Мелихова А.В. 2024. Многолетняя динамика площадей открытых песков в Астраханском Заволжье по данным дистанционного зондирования // Известия НВ АУК. № 1 (73). С. 135-143.
- Луян 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. 2015. 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. Т. 12. № 5. С. 263-284.
- Павлейчик В.М.* 2025. Вегетационные цветные индексы БПЛА и NDVI при выявлении особенностей и динамики растительности степных сенокосов // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». Т. 51. С. 47-59.
- Полтарин В.С., Шинкаренко С.С.* 2024. Сравнительный анализ методов машинного обучения при картографировании открытых песков и дефлированных пастбищ по спутниковым данным Sentinel-2 // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. Т. 68. № 4. С. 17-28.
- Рулев А.С., Канищев С.Н., Шинкаренко С.С.* 2016. Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13. № 4. С. 113-123.
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н.* 2022. Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 19. № 2. С. 130-141.
- Трофимов И.А., Яковлева Е.П.* 2015. О применении информационных технологий в картографировании агрогеосистем // Труды Института геологии Дагестанского научного центра РАН. № 65. С. 26-29.
- Шинкаренко С.С.* 2019. Пространственно-временная динамика опустынивания на Чёрных землях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 16. № 6. С. 155-168.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* 2022. Спутниковые наблюдения пыльных бурь на юге России в 2022 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 19. № 6. С. 293-300.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* 2023. Картографирование сорových понижений и солончаков в Северном Прикаспии на основе многолетних данных Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 20. № 5. С. 153-165.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* 2024. Анализ взаимосвязи структурных и спектрально-отражательных характеристик растительности аридных пастбищных ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 21. № 3. С. 171-187.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Биарсланов А.Б.* 2024. Изменения площадей открытых песков и дефлированных пастбищ на юго-востоке европейской части России в 2023 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 21. № 3. С. 321-330.
- Delaney B., Tansey K., Whelan M.* 2025. Satellite Remote Sensing Techniques and Limitations for Identifying Bare Soil // Remote Sensing. Vol. 17. Article No. 630.
- Huete A.* 1988. A Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI) // Remote Sensing of Environment. Vol. 25. No. 3. P. 295-309.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G.* 2002. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices // Remote Sensing of Environment. Vol. 83. No. 1. P. 195-213.
- Kebede T.A., Hailu B.T., Suryabhadgavan K.V.* 2022. Evaluation of Spectral Built-Up Indices for Impervious Surface Extraction Using Sentinel-2A MSI Imageries: A Case of Addis Ababa city, Ethiopia // Environmental Challenges. Vol. 8. Article No. 100568.
- Kimura R., Liu J., Ganzorig U., Moriyama M.* 2024. Development of a Simple Observation System to Monitor Regional Wind Erosion // Remote Sensing. Vol. 16. No. 17. Article No. 3331.
- Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Yu., Shinkarenko S.S.* 2018. On the 30th Anniversary of the “General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures” // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 1. P. 5-20. [Кулик К.Н., Петров В.И., Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. 2018. К 30-летию «Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ» // Аридные экосистемы. Т. 24. № 1 (74). С. 3-10.]
- Kulik K.N., Petrov V.I., Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Shinkarenko S.S.* 2020. Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 2. P. 98-105. [Кулик К.Н., Петров В.И., Юферева В.Г., Ткаченко Н.А., Шинкаренко С.С. 2020. Геоинформационный анализ опустынивания Северо-Западного Прикаспия // Аридные экосистемы. Т. 26. № 2 (83). С. 16-24.]
- Kulik K.N., Vlasenko M.V.* 2024. Experience in Implementing Major National Projects to Combat Degradation and Desertification in Russia // Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. Vol. 9. Article No. 100583.
- Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I.* 2022. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. V. 14. No. 1. Article No. 77.
- Marzouki A., Dridri A.* 2022. 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 // Journal of Arid Environments. Vol. 198. Article No. 104693.
- Nguen C.T., Chidthaisong A., Diem P.K., Huo L.* 2021. A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8 // Remote Sensing. Vol. 10. Article No. 231.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A., Kerr Y.H., Sorooshian S.* 1994. A modified soil adjusted vegetation index // Remote

- Sensing of Environment. Vol. 48. No. 2. P. 119-126.
- Sahar A.A., Rasheed M.J., Uaid D.A.A.-H., Jasimm A.A. 2021. Mapping Sandy Areas and Their Changes Using Remote Sensing. A Case Study at North-East Al-Muthanna Province, South of Iraq // *Revista de Teledeteccion*. Vol. 58. P. 39-52.
- Secu C.V., Stoleriu C.C., Lesenciuc C.D., Ursu A. 2022. Normalized Sand Index for Identification of Bare Sand Areas in Temperate Climates Using Landsat Images. Application to the South of Romania // *Remote Sensing*. Vol. 14. Article No. 3802.
- Slavko V.D., Andreeva O.V., Kust G.S. 2023. Assessment of the Dynamics of Land Cover at the Local Level to Achieve Land Degradation Neutrality (for Desertified Lands of the Dry-Steppe Zavolzh'e) // *Arid Ecosystems*. Vol. 13. No. 1. P. 50-58. [Славко В.Д., Андреева О.В., Куст Г.С. 2023. Оценка динамики наземного покрова в целях установления нейтрального баланса деградации земель на локальном уровне (для опустыненных угодий сухостепного Заволжья) // *Аридные экосистемы*. Т. 29. № 1 (94). С. 59-69.]
- Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. 2015. Remote indicators of desertification // *Arid Ecosystems*. Vol. 5. No. 1. P. 24-27. [Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. 2015. Дистанционные индикаторы опустынивания земель // *Аридные экосистемы*. Т. 21. № 1 (62). С. 36-40.]
- Wang Z., Ma Y., Zhang Y., Shang J. 2022. Review of Remote Sensing Applications in Grassland Monitoring // *Remote Sensing*. Vol. 14. No. 12. Article No. 2903.
- Xu D., Kang X., Qiu D., Zhuang D., Pan J. 2009. Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale – A Case Study in the Ordos Plateau, China // *Sensors*. Vol. 9. No. 3. P. 1738-1753.
- Yuferev V.G., Silova V.A., Tkachenko N.A. 2023. Remote Monitoring of Desertification in Kalmykia // *Arid Ecosystems*. Vol. 13. No. 1. P. 39-44. [Юферев В.Г., Силова В.А., Ткаченко Н.А. 2023. Дистанционный мониторинг опустынивания территории Калмыкии // *Аридные экосистемы*. Т. 29. № 1 (94). С. 46-52.]
- Yuferev V.G., Tkachenko N.A., Sinelnikova K.P. 2022. Spectral Characteristics of Desertified Black-Earth Pastures // *Arid Ecosystems*. Vol. 12. No. 1. P. 54-60. [Юферев В.Г., Ткаченко Н.А., Синельникова К.П. 2022. Спектральные характеристики опустыненных пастбищ Черных Земель // *Аридные экосистемы*. Т. 28. № 1 (90). С. 65-72.]
- Zhao C., Pan Y., Ren Sh., Gao Y. 2024. Accurate Vegetation Destruction Detection Using Remote Sensing Imagery Based on the Three-Band Difference Vegetation Index (TBDVI) and Dual-Temporal Detection Method // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 127. Article No. 103669.
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. 2011. A New Approach to the Monitoring of Desertification Centers // *Arid Ecosystems*. Vol. 1. No. 3. P. 125-140. [Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. 2011. Новый подход к мониторингу очагов опустынивания // *Аридные экосистемы*. Т. 17. № 3 (48). С. 14-22.]