

В. М. Павлейчик¹

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ NDVI И ЦВЕТНЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ БПЛА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ФИТОЦЕНОТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЕПНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Пространственно-временная вариативность в развитии степных пожаров во многом обусловлена особенностями сезонных, межгодовых и многолетних состояний растительного покрова. В то же время отсутствует объективное понимание того, какие фитоценологические параметры степной растительности фиксируются спектральными вегетационными индексами (СВИ) на основе материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В связи с этим, целью проведенного исследования стало выявление данных соответствий, а также апробирование материалов аэрофотосъемки в качестве дополнительного источника детализированной информации о пространственно-временной структуре растительного покрова. На участке, расположенном в предгорных степях Южного Урала, в 2023–2024 гг. проведены полевые исследования, в рамках которых ежемесячно за вегетационный сезон (апрель–октябрь) проводились описания и укусы растительности, аэрофотосъемка при помощи БПЛА со стандартным RGB-сенсором. Растительность представлена сообществом *Stipa zalesskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata* и его пастбищно-деградированным вариантом *Ceratocarpus arenarius* – *Potentilla bifurca*. Объективным достоинством аэрофотоснимков и схем распределения цветных вегетационных индексов (ЦВИ) NDI, VARI, ExG, GLI, ExGR, ExR на их основе является их высокая детализация, позволяющая оценивать особенности пространственной дифференциации растительного покрова, направленность сезонных и многолетних изменений. Выявлено, что значения NDVI Sentinel-1–2 и ЦВИ чаще всего отличались высокой корреляцией с проективным покрытием зеленой растительности. С другими фитоценологическими показателями (общее проективное покрытие, запасы фитомассы общие и зеленой растительности) тесная взаимосвязь наблюдалась в благоприятных для вегетации гидротермических условиях 2024 г. за счет обилия зеленой растительности. Полученные результаты дают основание считать, что основными факторами несоответствий между спектральными и цветными индексами и фактическими параметрами степных сообществ являются: а) перекрытие зеленой растительности мертвой фитомассой; б) малая доля участия разнотравья в структуре степных сообществ; в) сезонные различия в спектральном отклике доминирующих растений и в создаваемых ими аспектах; г) морфологические особенности видов растений, создаваемая ими объемная структура растительного покрова. Выявленные фенологические реакции сообществ на особенности гидротермических условий 2023 и 2024 гг. указывают на высокую степень межгодовой и сезонной вариативности их пожарного состояния.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: степные фитоценозы, NDVI, аэрофотоснимки, цветные вегетационные индексы, природные пожары

¹ Институт степи Уральского отделения РАН, ул. Пионерская, д. 11, Оренбург, Россия, 460000, e-mail: vmavleychik@gmail.com

Vladimir M. Pavleichik¹

THE EXPERIENCE OF USING NDVI AND COLOR VEGETATION INDEXES OF UAVS TO IDENTIFY PHYTOCENOTIC PARAMETERS OF STEPPE VEGETATION

ABSTRACT

The spatial and temporal variability in the development of steppe fires is largely due to the peculiarities of seasonal, interannual and long-term vegetation conditions. At the same time, there is no objective understanding of which phytocenotic parameters of steppe vegetation are recorded by spectral vegetation indices (SVI) based on Earth remote sensing materials. In this regard, the purpose of the study was to identify these correspondences, as well as to test aerial photography materials as an additional source of detailed information about the spatial and temporal structure of vegetation cover. In the area located in the foothill steppes of the Southern Urals, field studies were conducted in 2023–2024, during which vegetation descriptions and mowing were carried out monthly during the growing season (April–October), aerial photography using a UAV with a standard RGB-sensor. Vegetation is represented by the *Stipa zalesskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata* community and its pasture-degraded variant *Ceratocarpus arenarius* – *Potentilla bifurca*. The objective advantage of aerial photographs and color vegetation index (CVI) NDI, VARI, ExG, GLI, ExGR and ExR distribution schemes based on them is their high level of detail, which makes it possible to assess the features of spatial differentiation of vegetation cover, the direction of seasonal and long-term changes. It was revealed that the values of NDVI Sentinel-1–2 and CVI were most often highly correlated with the projective cover of green vegetation. A close relationship was observed with other phytocenotic indicators (total projected coverage, total phytomass reserves and green vegetation) in the hydrothermal conditions favorable for vegetation in 2024 due to the abundance of green vegetation. The results obtained suggest that the main factors of discrepancies between spectral and color indexes and the actual parameters of steppe communities are: a) the overlap of green vegetation with dead phytomass; b) the small share of diverse grasses in the structure of steppe communities; c) seasonal differences in the spectral response of dominant plants and in the aspects they create; d) morphological features of plant species, the volumetric structure of vegetation cover created by them. The revealed phenological reactions of communities to the features of hydrothermal conditions in 2023 and 2024 indicate a high degree of interannual and seasonal variability in their fire status.

KEYWORDS: steppe phytocenoses, NDVI, aerial photographs, color vegetation indexes, wildfires

ВВЕДЕНИЕ

Исследования, связанные с выявлением многолетней динамики развития природных пожаров, как правило, приходят к выводам об их высокой межгодовой вариативности, наличию фаз различной активности и трендов. Все эти признаки могут быть использованы для выявления причин пространственно-временной неоднородности пирологических обстановок, обусловленной широтно-зональными и региональными различиями степей, лесостепей и пустынь Северной Евразии, особенностями пространственной структуры угодий и их состоянием, а также традициями использования огня в сельскохозяйственных целях [Павлейчик и др., 2023а; Pavleychik et al., 2022]. В качестве наиболее очевидного объяснения неоднородности в развитии травяных пожаров указывается состояние рас-

¹ Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 11, Pionerskaya str., Orenburg, 460000, Russia, e-mail: vmavleychik@gmail.com

тительного покрова, чаще всего определяемого через показатели пастбищной нагрузки [Dubinin et al., 2011; Dara et al., 2020; Pavleychik et al., 2022; Shinkarenko et al., 2023]. Высокая значимость данного фактора для степей Северной Евразии во многом обусловлена стремительной деградацией сельскохозяйственной отрасли на фоне негативных социально-экономических процессов на всем постсоветском пространстве. В то же время значимость показателей, основанных на метеорологических данных (температура, количество и продолжительность волн тепла, атмосферные осадки, индекс Нестерова и др.) и определяющих степень благоприятности возникновения и распространения пожаров, не находит достаточного подтверждения статистическими методами анализа [Павлейчик и др., 2023б; Dubinin et al., 2011]. Причины данных несоответствий (как и от других предполагаемых факторов) в настоящее время остаются невыясненными. Данные по поголовью выпасаемого скота имеют большую продолжительность рядов и приводятся применительно к административным регионам, поэтому получаемые сведения могут быть использованы лишь в качестве макрорегионального показателя, косвенно отражающего состояние растительного покрова относительно того или иного промежутка времени. В свою очередь, материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) содержат ценнейшую информацию о спектральной неоднородности поверхности, что дает возможность их использования в различных научных направлениях, в частности для оценки условной фитопродуктивности посредством анализа спектральных вегетационных индексов (СВИ).

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные недорогими RGB-сенсорами, могут полноценно использоваться в целях мониторинга растительного покрова [Anderson et al., 2016; Diaz-Delgado, Múcher, 2019; Larrinaga, Brotons, 2019; Talucci et al., 2020; Furukawa et al., 2021; Martinez et al., 2021; Perez-Luque et al., 2022; Jaya et al., 2022]. Среди преимуществ БПЛА указывается возможность их применения в условиях быстрых изменений в вегетации растений, а также для регионов с преобладанием облачной погоды, не позволяющей получать спутниковые изображения [Talucci et al., 2020], лучшее качество RGB-изображений над мультиспектральными, что важно при съемке в условиях недостаточного освещения [Furukawa et al., 2021]. Очевидно, что наиболее ценным качеством изображений БПЛА является высокое пространственное разрешение, позволяющее оценивать пространственную структуру растительного покрова, вплоть до уровня отдельных побегов. На основе RGB-изображений рассчитываются цветные вегетационные индексы (ЦВИ).

Следует обратить внимание на то, что вегетационные индексы, хотя и имеют в целом универсальный характер применения, но большей частью апробируются и используются на типах растительности, отличающихся обилием зеленой массы — залесенные территории, сельскохозяйственные культуры и др. Травянистая степная растительность обладает гораздо меньшей сомкнутостью травостоя и рядом спектрально-отражательных особенностей, связанных с морфолого-анатомическими особенностями групп и отдельных видов, что может способствовать недооценке выявляемых показателей. Таким образом, важным этапом исследований, основанных на использовании СВИ и ЦВИ, является верификация получаемых данных наземными методами, которые достаточно трудоемки и, как правило, затрагивают локальные территории с ограниченным набором фитоценотического разнообразия. Существенный методологический задел в решение данной научно-методологической проблемы внесен исследованиями Института космических исследований РАН [Шинкаренко, Барталев, 2023, 2024] применительно к растительности северных пустынь и полупустынь Северного Прикаспия. Значимый интерес представляет исследование, выполненное на основе результатов многолетних исследований степной растительности Южного Предуралья (участок «Буртинская степь» заповедника «Оренбургский»), в сопоставлении с рядами значений NDVI [Хорошев и др., 2023]. Исследование с приме-

нением ЦВИ БПЛА проведено применительно к коренным и залежным степным сообществам в Забайкалье [Аюржанаев и др., 2021].

Целью проведенного исследования стало выявление возможностей использования вегетационных индексов на основе спутниковых снимков и RGB-изображений БПЛА для выявления основных фитоценологических показателей степных сообществ, определяющих пирогенные качества растительного покрова. Следовательно, при допустимом уровне достоверности пространственно-временные архивы данных по вегетационным индексам могут быть использованы при анализе причин сезонной, межгодовой и многолетней неоднородности развития пожаров. Исследование направлено на развитие методологии и накопление опыта применительно к различным ландшафтам и фитоценозам с учетом разнообразия гидротермических условий отдельных лет. Одним из новых подходов стало апробирование материалов аэрофотосъемки как дополнительного источника детализированной информации о пространственно-временной структуре растительного покрова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье приведены результаты исследований по двум площадкам, расположенным в районе распространения грядово-холмистого рельефа, характерного для предгорий Южного Урала и занимающих пологий придолинный (р. Урал) склон южной экспозиции (рис. 1).

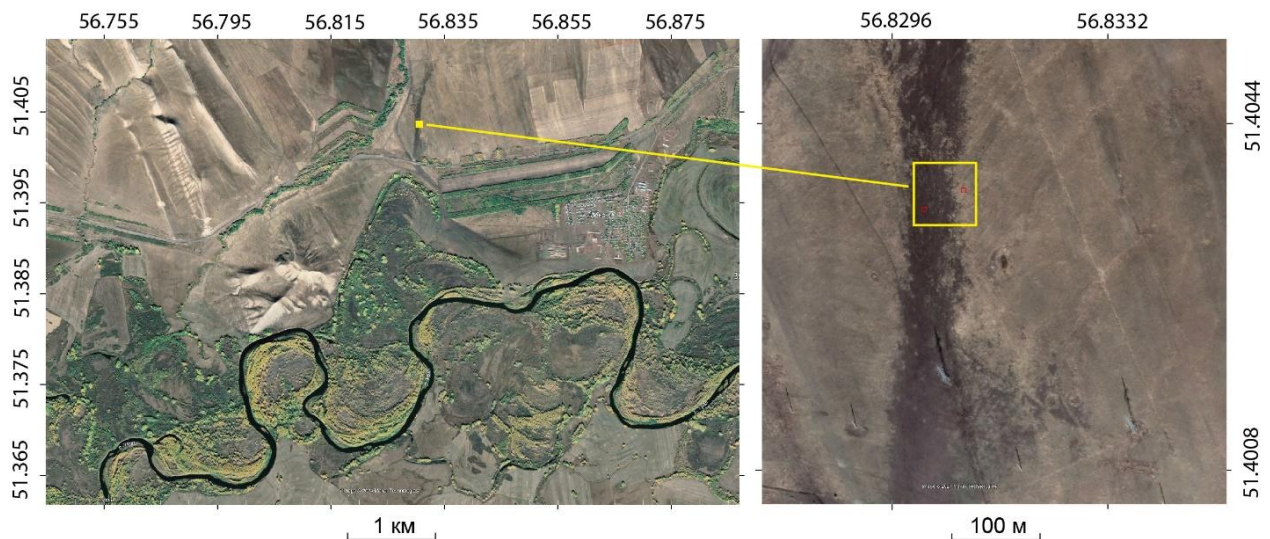


Рис. 1. Расположение территории исследования и мониторинговых площадок
Fig. 1. Location of the research area and monitoring sites

Выбор данной пары площадок обоснован характерностью фитоценоза и их доминантов для холмисто-увалистых равнин и склонов возвышенностей Заволжья и Южного Предуралья, а также контрастным состоянием одного сообщества на смежных площадках, что позволило оценить возможности применения СВИ и ЦВИ в качестве показателя некоторых фитоценологических характеристик степных сообществ. Площадка № 6 (в статье сохранена рабочая нумерация всех площадок, обследованных в 2023–2024 гг.) заложена в линейно вытянутой зоне прогона мелкого и крупного рогатого скота и отражает стадию сильной деградации степной растительности практически без присутствия представителей семейства Злаковые. Площадка № 7 находится на расстоянии 50 м, растительность отличается преобладанием плотнодерновинных злаков и более значимыми запасами надземной фитомассы, хотя имеет также и все признаки периодического выпаса.

В качестве гипотезы исследования предполагалось, что СВИ и ЦВИ должны тесно коррелировать между собой и с показателями проективного покрытия зеленой фитомассы по площадке № 6, с неопределенной погрешностью — для площадки № 7, отличающейся экранирующим влиянием ветоши и войлока. В данной статье мы ограничиваемся одной парой площадок ввиду больших объемов фактической информации, которую считаем важной для понимания рассматриваемой методологической и практической проблемы.

В 2023 и 2024 гг. ежемесячно, с конца апреля по октябрь включительно, были проведены укосы надземной фитомассы с площадок 0,5×0,5 м трехкратной повторности, описания видового состава, определение показателей проективного покрытия. Далее производился разбор образцов на зеленую фитомассу, ветошь и войлок по группам (злаки, разнотравье, полыни, кустарники и кустарнички) с последующим взвешиванием.

При помощи БПЛА, оборудованного 1-дюймовым CMOS-сенсором 20 МП (разрешение 5472×3648) и объективом, обеспечивающим угол обзора 88°, получены фотографические RGB-изображения на различных уровнях от поверхности (2, 5, 25, 75, 100 м). Аэрофотографии использовались для расчета значений цветных (хроматических) вегетационных индексов:

- $ExG = 2 * g - r - b$,
- $ExGR = 3 * g - 2.4 * r - b$,
- $ExR = 1.4 * r - g$,
- $NDI = (g - r) / (g + r)$,
- $VARI = (g - r) / (g + r - b)$,
- $GLI = (2 * g - b - r) / (2 * g + b + r)$.

В расчетах приняты нормированные значения каждого из каналов в виде отношения значений к сумме каналов ($R + G + B$). В статье приводятся результаты с аэрофотоснимков, полученных с высоты 100 м, послуживших основой для подготовки схем пространственного распределения ЦВИ и расчета их числовых показателей с площадок 5×5 м, максимально приближенных к участкам проведения укосов. Аэрофотографии с превышением 5 м над поверхностью (площадки 5×5 м) и наземные фотографии применялись для уточнения проективного покрытия.

Ряды числовых значений NDVI за бесснежные периоды 2023 и 2024 гг. получены по данным платформы OneSoil (использующей снимки Sentinel-1–2) для обеих площадок, точки (пиксели) снятия данных смещены на смежные более однородные территории для минимизации погрешностей, связанные с близким расположением площадок. Теснота связей между рассматриваемыми числовыми показателями оценивалась расчетом как стандартных коэффициентов парной корреляции, так и ранговых Спирмена. Гидротермический коэффициент Селянинова рассчитан по данным метеостанции Оренбург, находящейся на удалении 125 км к западу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже отмечалось, в качестве основной причины долгосрочных изменений в региональных пожарных обстановках указывается смена уровня пастбищной нагрузки и, соответственно, количества растительного топлива. В то же время запасы фитомассы, как и другие взаимозависимые и пирогенно-значимые параметры сообществ (сомкнутость травостоя, соотношение зеленой и сухой массы, доленое участие злаков и др.), а также активность деструкционных процессов весьма вариативны, исходя из метеоклиматических условий. В связи с этим значительный интерес представляют особенности сезонной, межгодовой и многолетней динамики фитоценологических показателей степных сообществ.

В данном исследовании существенные различия гидротермических условий 2023 и 2024 гг. предоставили возможность оценить их влияние на активность вегетации, сезонную и межгодовую динамику зеленой и мортмассы (рис. 2).

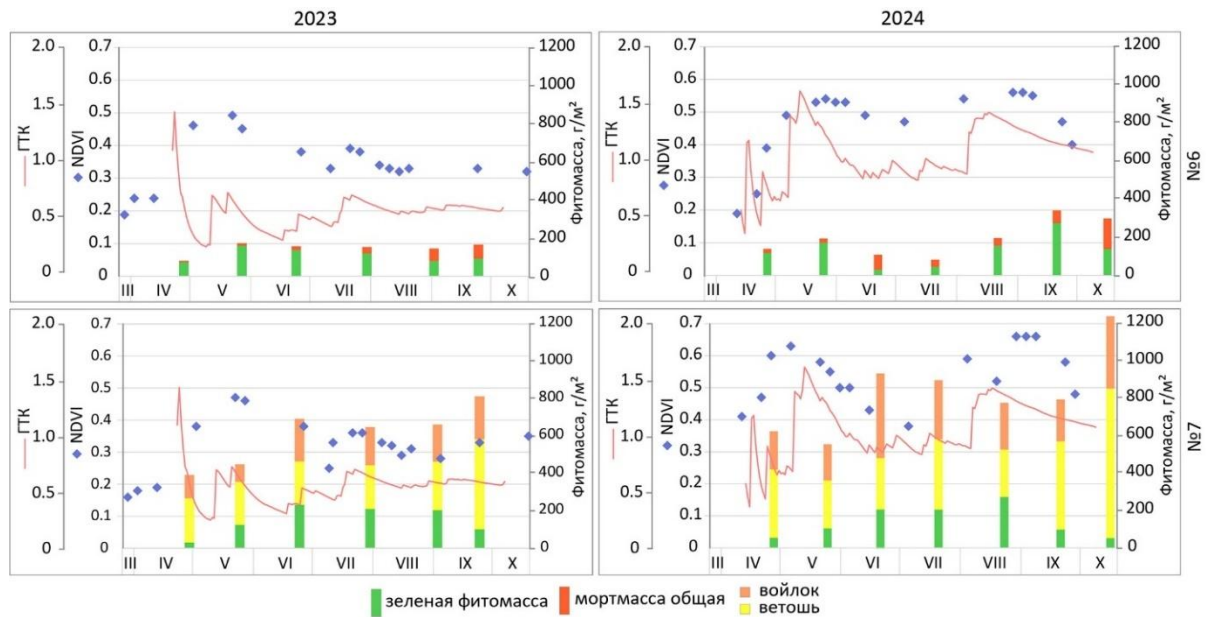


Рис. 2. Совмещенные графики NDVI, гидротермического коэффициента Селянинова и запасов надземной фитомассы
 Fig. 2. Combined graphs of NDVI, Selyaninov hydrothermal coefficient and aboveground phytomass reserves

Площадка № 6 отражает одну из финальных стадий пастбищной деградации степных сообществ. В 2023 г. растительность представлена практически сообществом с доминированием рогача песчаного (*Ceratocarpus arenarius*) и лапчатки вильчатой (*Potentilla bifurca*). Все остальные отмечаемые виды были представлены угнетенными экземплярами полыни австрийской (*Artemisia austriaca*), ковыля тырсы (*Stipa capillata*), типчака (*Festuca valesiaca*), ковыля Лессинга (*Stipa lessingiana*), бурачка туркестанского (*Alyssum turkestanicum*). В течение вегетационного периода общее проективное покрытие (ОПП) варьировалось от 50–55 % в конце апреля до 80–85 % в начале июня и в сентябре, за вегетационный сезон происходила поступательная трансформация зеленой фитомассы в сухую. Весна 2024 г. отличалась поздним наступлением и благоприятными гидротермическими условиями на протяжении практически всего теплого периода. В апреле-мае видовое богатство сообщества было более заметным; помимо доминанты, активно вегетировали хориспора нежная (*Chorispora tenella*) и бурачок туркестанский. К концу июня зеленая фитомасса принадлежала практически исключительно единичным представителям злаковых, а проективное покрытие сократилось до 35–45 %. При лучших условиях увлажнения в 2024 г. в июле через обширный регион дополнительно прошла серия ливневых дождей, что способствовало активной и продолжительной вегетации многих видов растений, как представителей злаковых, так и разнотравья. Наблюдалась вегетация ранее угнетенных видов — тысячелистник благородный (*Achillea nobilis*), зубровка ползучая (*Hierochloa repens*), полынь австрийская, люцерна серповидная (*Medicago falcata*), горец птичий (*Polygonum aviculare*), лапчатка серебристая (*Potentilla argentea*) и др. К концу августа был достигнут максимум проективного покрытия (80–85 %) зеленой фитомассой, причем почти полностью за счет преобладания лапчатки вильчатой.

Площадка № 7 представлена залесскоковыльно-типчаково-тырсовым (*Stipa zaleskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata*) сообществом с ОПП 60–70 % со значительно меньшей пастбищной нагрузкой, чем в районе площадки № 6. Помимо доминирующих видов, участие в сложении сообщества принимают:

тысячелистник благородный,
 полынь австрийская,
 мятлик луковичный (*Poa bulbosa*),
 люцерна серповидная,
 астрагал яйцеплодный (*Astragalus testiculatus*),
 икотник серый (*Berteroa incana*),
 зопник колючий (*Phlomis pungens*),
 тимьян Маршалла (*Thymus marschallianus*),
 вероника белойочная (*Veronica incana*) и др.

Разнотравье в данном сообществе играет небольшую роль, поэтому резких смен аспектов за рассматриваемые годы не наблюдалось. В 2023 г. в районе этой площадки отмечалось традиционное нарастание зеленой фитомассы злаков с максимумом в июне-июле, далее — сокращение вплоть до окончания вегетационного периода. И наоборот, запасы растительной ветоши были максимальными в апреле-мае и в сентябре-октябре. С позиций пироженности степных сообществ следует отметить сохранность ветоши ковыля тырсы, достигающей высоты 1,2–1,4 м, также определенно имеющей экранирующее воздействие относительно съемки зеленой растительности дистанционными способами. Условия 2024 г. не отразились для залесскоковыльно-типчаково-тырсового сообщества обильной вегетацией разнотравья, в то же время привели к массовому плодоношению ковыля тырсы в июле-августе и к меньшей сохранности растительной ветоши и войлока ввиду активизации процессов деструкции растительного вещества. К концу вегетации были накоплены значительные объемы зеленой и мортмассы (сентябрь), к октябрю количество зеленой фитомассы резко сократилось.

Приведенные выше особенности вегетации на рассматриваемых площадках в 2023 и 2024 гг. отчетливо фиксируются наземными фотографиями, аэрофотоснимками и схемами распределения ЦВИ на их основе (рис. 3–4).

Отсутствие ветоши и войлока злаков, ярусности в растительном покрове на площадке № 6 создает практически идеальные условия для выявления некоторых фитоценологических показателей средствами ДЗЗ. При этом следует учитывать тот факт, что смена фенологических состояний многих степных видов растений приводит к изменению спектральных параметров, что создает фактор неопределенности для интерпретации используемых материалов ДЗЗ. Для рассматриваемого участка таким наиболее изменчивым видом являлся рогач песчаный. В условиях экстремального летнего увлажнения нехарактерным откликом рассматриваемых растительных сообществ стала смена другими, ранее угнетенными видами (площадка № 6) и массовое плодоношение ковыля тырсы (площадка № 7). Таким образом, межгодовые вариации в вегетации отдельных видов и групп растений как отклик на смену внешних условий и ввиду возможного существования периодичности генеративных состояний в жизненном цикле дерновинных злаков являются одной из значимых проблем для интерпретации материалов ДЗЗ. Все перечисленное выше свидетельствует о том, что использование исключительно СВИ и ЦВИ без натурного обследования с большой долей вероятности может приводить к необъективным результатам и выводам.

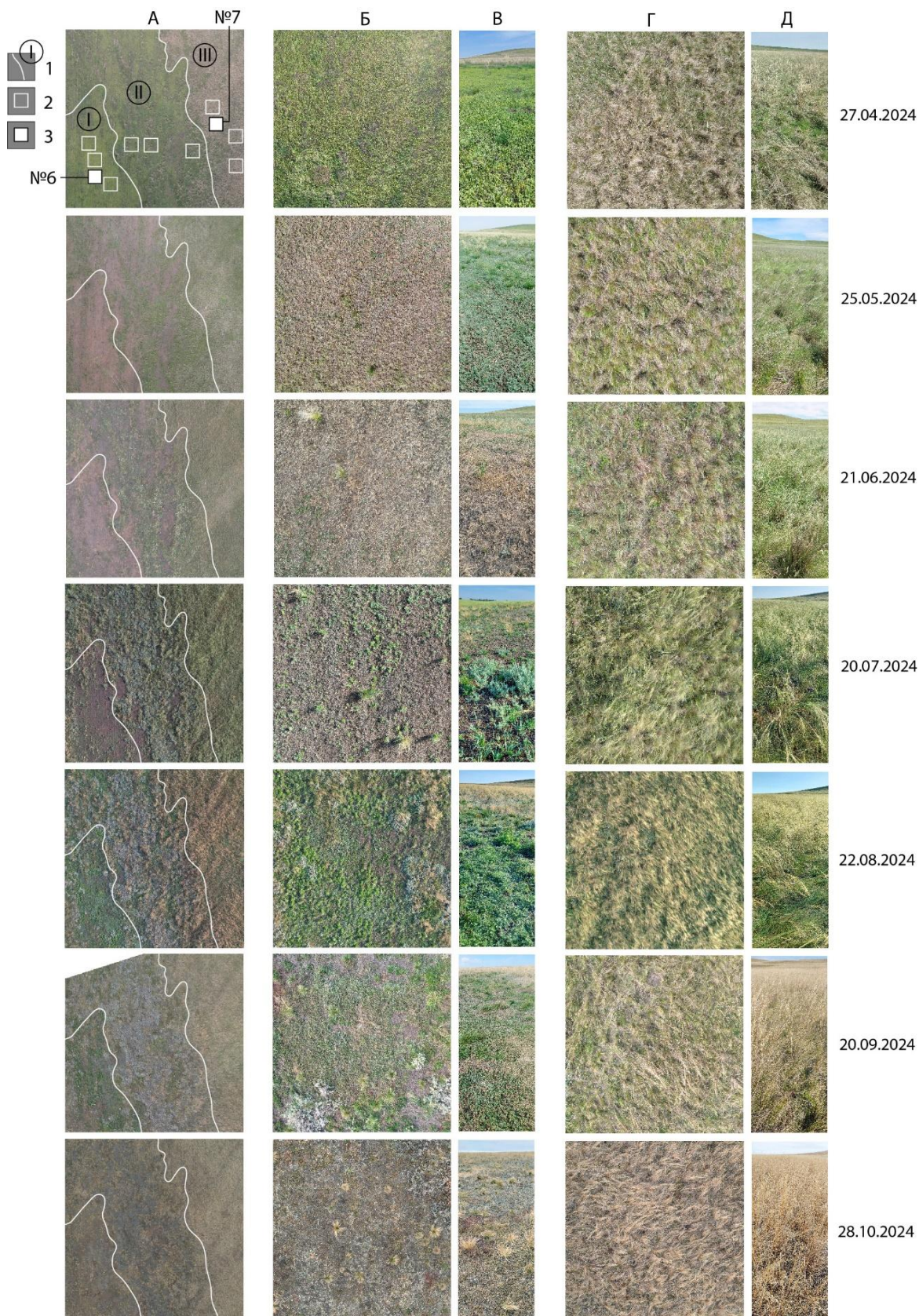


Рис. 3. Временная серия RGB-снимков участка в 2024 г.
 Fig. 3. Time series of RGB-images of the site in 2024

Условные обозначения к рис. 3:

А — фрагменты обзорных снимков с высоты 100 м:

1 — границы растительных сообществ:

I — *Ceratocarpus arenarius* – *Potentilla bifurca*,

II — переходное сообщество,

III — *Stipa zalesskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata*.

2 — площадки 5×5 м, принятые для расчетов ЦВИ;

3 — участки проведения укосов, площадки № 6 и № 7.

Б–Д — аэрофотографии (Б и Г) и наземные снимки (В и Д) сообществ *Ceratocarpus arenarius* – *Potentilla bifurca* и *Stipa zalesskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata*, соответственно.

Legend to Fig. 3:

A — fragments of survey images from a height of 100 m:

1 — boundaries of plant communities:

I — *Ceratocarpus arenarius* – *Potentilla bifurca* community,

II — transitional community,

III — *Stipa zalesskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata* community.

2 — 5×5 m sites used for VI calculations;

3 — mowing sites, sites No. 6 and No. 7).

B–E — aerial photographs (B and D) and ground-based images (C and E) of the *Ceratocarpus arenarius* – *Potentilla bifurca* and *Stipa zalesskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata* communities, respectively.

Ниже приведены числовые значения ЦВИ для каждой из площадок — песчано-рогачево-вильчатоплапчатковое (площадка № 6) и залесскоковыльно-типчаково-тырсовое (№ 7) сообщества, а также переходная зона между ними в виде неоднородных по флористическому составу группировок с доминированием в различных соотношениях рогача песчаного, полыни австрийской и тысячелистника благородного, отдельными дернинами ковыля тырсы и других злаков (рис. 5). Как и предполагалось, отсутствие ветоши и войлока злаков на площадке № 6 в сочетании с активной вегетацией в благоприятные периоды рассматриваемых лет способствует гораздо более объективному отображению СВИ и ЦВИ наблюдаемых сезонных изменений. Синхронный характер сезонной динамики значений ЦВИ подтверждается теснотой корреляционных связей (как положительных, так и отрицательных) между ними. Для залесскоковыльно-типчаково-тырсового сообщества площадки № 7 с обилием запасов мортмассы сезонная динамика индексов не столь очевидна. Практически ни один из индексов не отразил фактической динамики состояния растительного покрова, выражавшейся в нарастании запасов зеленой фитомассы в летние месяцы. При этом взаимосвязь между индексами в благоприятный для вегетации 2024 г. для обеих площадок была более существенной в сравнении с засушливым в целом 2023 г.

Индекс NDVI Sentinel-1–2 в 2023 г. ожидаемо показал хорошую достоверность для площадки № 6 по отношению к проективному покрытию зеленой растительностью, в меньшей степени — для площадки № 7 (рис. 6А). Следовало ожидать, что активная вегетация в благоприятных условиях 2024 г. будет способствовать более тесным зависимостям между NDVI и фитоценотическими показателями рассматриваемых сообществ, но этого не наблюдалось. В качестве предполагаемых причин данного несоответствия на фоне обилия зеленой фитомассы — особенности спектрально-отражательных свойств доминирующих видов в различные фазы вегетации и накопление мортмассы (последнее для залесскоковыльно-типчаково-тырсового сообщества). Практически во всех случаях общее проективное покрытие имело хорошую взаимосвязь с общей фитомассой, проективное покрытие зеленой растительностью — с запасами зеленой фитомассы.

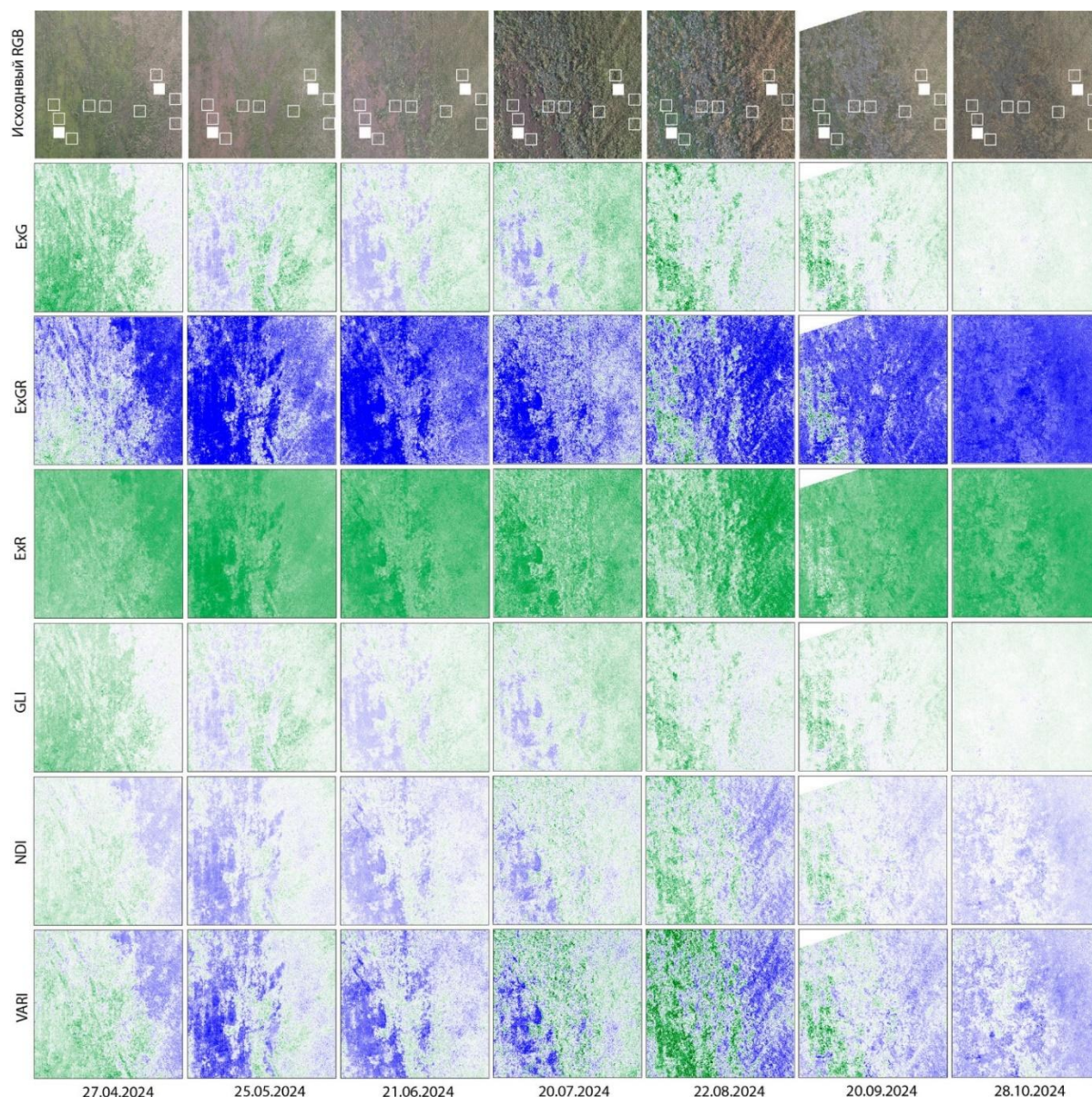


Рис. 4. Сезонная динамика в 2024 г. значений ЦВИ, полученных на основе аэрофотографий по участку, охватывающему две смежных мониторинговые площадки № 6 и № 7

Fig. 4. Seasonal dynamics in 2024 of CVI values obtained on the basis of aerial photography in the area covering two adjacent monitoring sites No. 6 and No. 7

Вегетационные цветовые индексы показывают неоднородность по годам и по площадкам, по отношению как к NDVI, так и к фактическим показателям сообществ (рис. 6Б). Так, тесная взаимосвязь всех ЦВИ к NDVI наблюдалась в одном из рассматриваемых вариантов — площадка № 6 в 2023 г., тогда как с данными по площадке № 7 в 2024 г., наоборот, имела устойчивую отрицательную корреляцию. По отношению к проективному покрытию зеленой растительностью ЦВИ наиболее часто показывали тесную взаимосвязь, особенно в теплый и влажный 2024 г.; для обеих площадок наиболее сопоставимыми стали индексы ExG, ExGR, GLI. Заметим, что ExG и ExGR указываются [Аюржанаев и др., 2021] в качестве наилучших индексов для оценки количества надземной фитомассы коренных и залежных степных сообществ (на примере участков в Забайкалье).

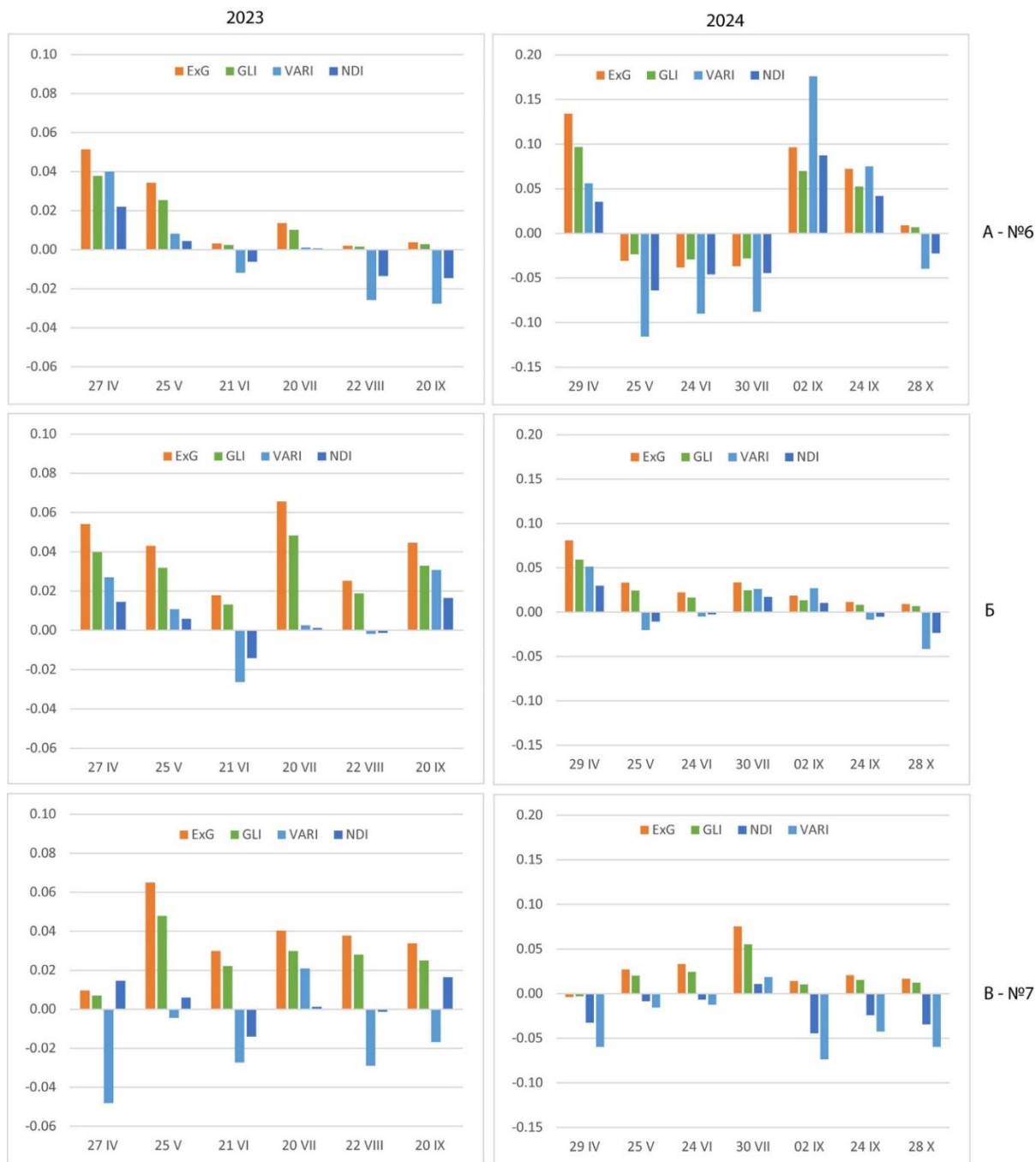


Рис. 5. Динамика ЦВИ по площадкам 5x5 м (средние значения).

А — сообщество *Ceratocarpus arenarius* – *Potentilla bifurca*, Б — переходная зона,
 В — сообщество *Stipa zalesskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata*

Fig. 5. Dynamics of CVI on 5x5 m sites (average values).

А — *Ceratocarpus arenarius* – *Potentilla bifurca* community, Б — transitional zone,
 С — *Stipa zalesskii* – *Festuca valesiaca* – *Stipa capillata* community

В то же время в 2023 г. лучше остальных показали себя индексы ExR и VARI. В целом сезонный ход значений ЦВИ гораздо более тесно соотносился практически со всеми с фитоценологическими показателями сообществ в 2024 г.; особенно заметно это отразилось для залесскоковыльно-типчачово-тырсового сообщества, причем по большин-

ству показателей (возможно, за счет высокой детализации снимков, зафиксировавших аспект цветущего ковыля тырсы). Выявлено, что по мере нарастания детализации снимков (при использовании RGB-изображений с меньших высот) во всех случаях наблюдается рост значений коэффициентов парной корреляции.

		2023					2024						
		NDVI	ОПП	ПП зел.	ФМ общ.	ФМ зел.			NDVI	ОПП	ПП зел.	ФМ общ.	ФМ зел.
№6	NDVI	x	-0.04	0.81	0.19	0.41	NDVI	x	0.29	0.26	0.31	0.37	
	ОПП		x	0.09	0.83	0.54	ОПП		x	0.97	0.80	0.63	
	ПП зел.			x	0.37	0.77	ПП зел.			x	0.66	0.54	
	ФМ общ.				x	0.83	ФМ общ.				x	0.89	
	ФМ зел.					x	ФМ зел.					x	
№7	NDVI	x	-0.11	0.60	-0.43	0.09	NDVI	x	-0.09	-0.69	-0.64	-0.79	
	ОПП		x	-0.63	-0.74	-0.40	ОПП		x	0.61	0.92	0.24	
	ПП зел.			x	0.20	0.66	ПП зел.			x	0.88	0.79	
	ФМ общ.				x	0.37	ФМ общ.				x	0.60	
	ФМ зел.					x	ФМ зел.					x	

А

		2023					2024						
		NDVI	ОПП	ПП зел.	ФМ общ.	ФМ зел.			NDVI	ОПП	ПП зел.	ФМ общ.	ФМ зел.
№6	NDI	0.87	-0.43	0.60	-0.26	0.03	NDI	0.14	0.80	0.77	0.54	0.31	
	ExG	0.73	-0.26	0.31	-0.03	-0.03	ExG	-0.03	0.89	0.94	0.54	0.49	
	ExGR	0.87	-0.37	0.54	-0.09	0.09	ExGR	0.03	0.80	0.83	0.37	0.14	
	ExR*	-0.84	0.43	-0.60	0.26	-0.03	ExR*	-0.14	-0.74	-0.77	-0.54	-0.31	
	Vari	0.87	-0.43	0.60	-0.26	0.03	Vari	0.14	0.80	0.77	0.54	0.31	
	GLI	0.73	-0.26	0.31	-0.03	-0.03	GLI	-0.03	0.89	0.94	0.54	0.49	
№7	NDI	-0.09	0.11	-0.37	-0.14	-0.89	NDI	-0.56	0.86	0.65	0.83	0.14	
	ExG	0.09	-0.06	0.14	-0.09	0.26	ExG	-0.70	0.86	0.82	0.91	0.40	
	ExGR	0.14	-0.26	0.26	0.03	0.14	ExGR	-0.70	0.86	0.82	0.91	0.40	
	ExR*	-0.20	0.51	-0.60	-0.14	-0.37	ExR*	0.59	0.06	0.19	0.29	0.63	
	Vari	0.20	-0.46	0.60	0.14	0.37	Vari	-0.56	0.86	0.65	0.83	0.14	
	GLI	0.09	-0.06	0.14	-0.09	0.26	GLI	-0.70	0.86	0.82	0.91	0.40	

Б

Рис. 6. Распределение коэффициента ранговой корреляции Спирмена между спектральными вегетационными (А) и цветными вегетационными (Б) индексами и параметрами растительного покрова

Fig. 6. Distribution of Spearman's rank correlation coefficient between spectral vegetation (A) and color vegetation (B) indices and vegetation cover parameters

Сокращения к рис. 6:

ОПП — общее проективное покрытие,

ПП зел. — проективное покрытие зеленой растительностью,

ФМ общ. — фитомасса общая (зеленая и мортмасса),

ФМ зел. — фитомасса зеленая.

Цветовым градиентом, от синего к красному, показано нарастание тесноты связей (*для индекса ExR выделены значения и весомых отрицательных корреляций).

Abbreviations to Fig. 6:

OPP — general projective cover,

PP green — projective cover with green vegetation,

FM total — total phytomass (green and mortmass),

FM green — phytomass is green.

The color gradient, from blue to red, shows an increase in the closeness of connections (*values of significant negative correlations are highlighted for the ExR index).

Перечисленное выше согласуется как с нашим предположением, так и с выводами [Хорошев и др., 2023] о том, что основная взаимосвязь NDVI и степной растительности прослеживается через количество зеленой фитомассы и через его отношение к надземной мортмассе. В то же время не подтвердилось заключение [Хорошев и др., 2023] о том, что основной вклад в значение NDVI вносит надземная масса живого разнотравья — в нашем случае незначительное присутствие разнотравья в залесскоковыльно-типчаково-тырсовом сообществе отразилось в виде слабых корреляционных зависимостей ЦВИ с основными фактическими показателями этого сообщества в сухой (2023) год и сильных зависимостей в период активной вегетации злаков (2024). Индекс NDVI неплохо коррелировал с показателем проективного покрытия зеленой растительностью в 2023 г. и имел невыраженную (площадка № 6), либо отрицательную (площадка № 7) тесноту связей в 2024 г.

ВЫВОДЫ

Несмотря на небольшую выборку данных, ограниченную двумя вегетационными периодами и одной парой укосных площадок, считаем, что полученные результаты в достаточной мере отчетливо демонстрируют особенности и возможности использования спектральных и цветных вегетационных индексов при оценке состояния степной растительности. Получению объективных результатов во многом способствовали контрастность выбранных площадок (в части флористического состава, отсутствия/наличия растительной ветоши и войлока) и гидротермические различия 2023 и 2024 гг.

Из всех сопоставляемых рядов данных объективными являются показатели растительного покрова, полученные наземными способами, в то время как вегетационные спектральные и цветные индексы — это лишь варианты интерпретации плоскостных изображений, в свою очередь являющихся проекцией элементов растительного покрова на земную поверхность. В этой связи наиболее сопоставимым с ними параметром является проективное покрытие (степень сомкнутости) зеленой растительностью. При этом факторами неопределенности, вносящими коррективы в значения ЦВИ, могут выступать:

- а) спектральные особенности слагающих растительный покров видов растений;
- б) характерные стадии вегетации растений (фенофазы) и создаваемые ими аспекты;
- в) морфологические особенности видов растений и создаваемая ими объемная структура растительного покрова и ярусность;
- г) степень перекрытия зеленой растительности мертвой фитомассой — ветошью и войлоком;
- д) доля участия разнотравья в структуре степных сообществ.

Объективным недостатком исследований с использованием данных с БПЛА является необходимость их организации с определенной периодичностью съемки, ограниченный охват территории и отсутствие ретроспективных данных. В то же время исходные аэрофотоснимки и получаемые на их основе схемы распределения ЦВИ отличаются высокой детализацией и способствуют более достоверному пониманию пространственной структуры и некоторых особенностей состояния растительного покрова. Использование БПЛА однозначно рекомендуется для выбора мониторинговых площадок, в т. ч. для учета ландшафтно-фациального разнообразия местности и идентификации влияния отдельных слабодешифрируемых видов природопользования (сенокосы, пастбищная деградация и др.). Более объективного понимания можно достичь формированием полноценного каталога с данными о коэффициентах спектральной яркости отдельных видов или групп растений на основе использования полевых спектрометров, по аналогии с [Шинкаренко, Барталев, 2023].

Относительно применяемых методологических подходов рекомендуется: а) обязательная корректировка баланса белого исходных снимков; б) использование не одиночных аэрофотоснимков, а серий снимков с продольным и поперечным перекрытием кадров 75–80 % с последующим построением ортофотопланов — для более точной привязки и лучшего качества изображений при подготовке схем ЦВИ.

Количество степного войлока и ветоши в залесскоковыльно-типчаково-тырсовом сообществе за период наблюдений всегда преобладало над зеленой фитомассой и postupательно увеличивалось к окончанию вегетационного периода, что свидетельствует о потенциальной пирогенности зональных степных участков. Сложность (даже практически невозможность) объективной оценки запасов мортмассы средствами ДЗЗ определяет возможность использования NDVI в пирологических исследованиях лишь в качестве условного показателя запасов зеленой фитомассы — отложенного во времени фактора формирования пожарных обстановок.

БЛАГОДАРНОСТИ

При поддержке гранта РФФ № 23-27-00134 «Природные пожары в степных регионах Евразии как индикатор природных и социально-экономических изменений» получен фактический материал и проведен первичный анализ данных. В рамках выполнения темы государственного задания Института степи УрО РАН № АААА-А21-12101190016-1 «Проблемы степного природопользования в условиях современных вызовов: оптимизация взаимодействия природных и социально-экономических систем» скорректированы методологические подходы, выполнены расчеты, сформулированы окончательные выводы.

ACKNOWLEDGEMENTS

With the support of the Russian Science Foundation grant No. 23-27-00134 “Wildfires in the steppe regions of Eurasia as an indicator of natural and socio-economic changes”, factual material was obtained and a primary data analysis was carried out. As part of the implementation of the topic of the state assignment of the Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences No. ААААА-А21-12101190016-1 “Problems of Steppe Nature Management in the Context of Modern Challenges: Optimizing the Interaction of Natural and Socio-Economic Systems”, methodological approaches were adjusted, calculations were performed, and final conclusions were formulated.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аюржанаев А. А., Алымбаева Ж. Б., Жарникова М. А., Содномов Б. В. О возможности оценки наземной фитомассы степной растительности с помощью цветных вегетационных индексов (по данным съемки с беспилотных систем). Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география, 2021. Т. 68. № 4. С. 45–53. DOI: 10.18101/2587-7143-2021-4-45-53.

Аюржанаев А. А., Ильин Ю. М., Содномов Б. В., Жарникова М. А., Алымбаева Ж. Б. Влияние высоты съемки и зенитного угла солнца на вегетационные индексы пшеницы по данным БПЛА. Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2024. № 5. С. 12–18. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-5-12-18.

Павлейчик В. М., Сивохин Ж. Т., Падалко Ю. А. Региональные особенности формирования пирологических обстановок в степях Северной Евразии на основе данных FIRMS. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационная поддержка устойчивого развития регионов в условиях кризиса. М.: Географический факультет МГУ, 2023. Т. 29. Ч. 1. С. 423–436. DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-423-436.

Павлейчик В. М., Языкбаев Э. Р., Сивохин Ж. Т., Падалко Ю. А. Особенности формирования и реализации пожароопасных обстановок в Урало-Каспийском регионе в аномально жаркие и засушливые годы. *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле»*, 2023. Т. 43. С. 62–78. DOI: 10.26516/2073-3402.2023.43.62.

Хорошев А. В., Калмыкова О. Г., Дусаева Г. Х. Оценка индекса NDVI как источника информации о наземной фитомассе в степях. *Исследование Земли из космоса*, 2023. № 3. С. 27–43. DOI: 10.31857/S020596142303003X.

Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Анализ влияния видового состава, проективного покрытия и фитомассы растительности аридных пастбищных ландшафтов на их спектрально-отражательные свойства по данным наземных измерений. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2023. Т. 20. № 3. С. 176–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192.

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.

Anderson H. B., Nilsen L., Tommervik H., Karlsen S. R., Nagai S., Cooper E. J. Using Ordinary Digital Cameras in Place of Near-Infrared Sensors to Derive Vegetation Indices for Phenology Studies of High Arctic Vegetation. *Remote Sensing*, 2016. V. 8. P. 847. DOI: 10.3390/rs8100847.

Dara A., Baumann M., Hölzel N., Hostert P., Kamp J., Müller D., Ullrich B., Kuemmerle T. Post-Soviet Land-Use Change Affected Fire Regimes on the Eurasian Steppes. *Ecosystems*, 2020. V. 23. No. 3. DOI: 10.1007/s10021-019-00447-w.

Diaz-Delgado R., Mücher S. Editorial of Special Issue “Drones for Biodiversity Conservation and Ecological Monitoring”. *Drones*, 2019. V. 3. P. 47. DOI: 10.3390/drones3020047.

Dubin M., Lushchekina A., Radeloff V. Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? *Ecosystems*, 2011. V. 14. P. 547–562. DOI: 10.1007/s10021-011-9427-9.

Furukawa F., Laneng L. A., Ando H., Yoshimura N., Kaneko M., Morimoto J. Comparison of RGB and Multispectral Unmanned Aerial Vehicle for Monitoring Vegetation Coverage Changes on a Landslide Area. *Drones*, 2021. V. 5. P. 97. DOI: 10.3390/drones5030097.

Jaya N. M. P., Harmayani K. D., Widhiawati A. R., Atmaja G. S., Jaya M. W. Spatial Analysis of Vegetation Density Classification in Determining Environmental Impacts Using UAV Imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022. V. V-3-2022. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-3-2022-417-2022.

Larrinaga A. R., Brotons L. Greenness Indices from a Low-Cost UAV Imagery as Tools for Monitoring Post-Fire Forest Recovery. *Drones*, 2019. V. 3. P. 6. DOI: 10.3390/drones3010006.

Martinez J. L., Lucas-Borja M. E., Plaza-Alvarez P. A., Denisi P., Moreno M. A., Hernandez D., Gonzalez-Romero J., Zema D. A. Comparison of Satellite and Drone-Based Images at Two Spatial Scales to Evaluate Vegetation Regeneration after Post-Fire Treatments in a Mediterranean Forest. *Applied Sciences*, 2021. V. 11. P. 5423. DOI: 10.3390/app11125423.

Pavleychik V. M., Chibilev A. A., Padalko Yu. A. Pyrological Situation in the Steppes of Northern Eurasia. *Doklady Earth Sciences*, 2022. V. 505. Part 2. P. 591–597. DOI: 10.1134/S1028334X22080141.

Perez-Luque A. J., Ramos-Font M. E., Barbieri M. J. T., Perez C. T., Renta G. C., Cruz A. B. R. Vegetation Cover Estimation in Semi-Arid Shrublands after Prescribed Burning: Field-Ground and Drone Image Comparison. *Drones*, 2022. V. 6. P. 370. DOI: 10.3390/drones6110370.

Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Doroshenko V. V., Naichuk Ya. A. An Analysis of the Dynamics of Areas Affected by Steppe Fires in Western Kazakhstan on the Basis of Earth Remote Sensing Data. *Arid Ecosystems*, 2023. V. 13. No. 1. P. 29–38. DOI: 10.1134/S2079096123010122.

Talucci A. C., Forbath E., Kropp H., Alexander H. D., DeMarco J., Paulson A. K., Zimov N. S., Zimov S., Loranty M. M. Evaluating Post-Fire Vegetation Recovery in Cajander Larch Forests in Northeastern Siberia Using UAV Derived Vegetation Indices. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. P. 2970. DOI: 10.3390/rs12182970.

REFERENCES

Anderson H. B., Nilsen L., Tommervik H., Karlsen S. R., Nagai S., Cooper E. J. Using Ordinary Digital Cameras in Place of Near-Infrared Sensors to Derive Vegetation Indices for Phenology Studies of High Arctic Vegetation. *Remote Sensing*, 2016. V. 8. P. 847. DOI: 10.3390/rs8100847.

Ayurzhanaev A. A., Alymbaeva Zh. B., Zharnikova M. A., Sodnomov B. V. On the Possibility of Assessing the Aboveground Phytomass of Steppe Vegetation Using Color Vegetation Indices (According to Data from Surveys from Unmanned Systems). *Bulletin of the Buryat State University. Biology, Geography*, 2021. V. 68. No. 4. P. 45–53 (in Russian). DOI: 10.18101/2587-7143-2021-4-45-53.

Ayurzhanaev A. A., Ilyin Yu. M., Sodnomov B. V., Zharnikova M. A., Alymbaeva Zh. B. The Influence of the Survey Altitude and the Zenith Angle of the Sun on Wheat Vegetation Indices According to UAV Data. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2024. No. 5. P. 12–18 (in Russian). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-5-12-18.

Dara A., Baumann M., Hölzel N., Hostert P., Kamp J., Müller D., Ullrich B., Kuemmerle T. Post-Soviet Land-Use Change Affected Fire Regimes on the Eurasian Steppes. *Ecosystems*, 2020. V. 23. No. 3. DOI: 10.1007/s10021-019-00447-w.

Diaz-Delgado R., Múcher S. Editorial of Special Issue “Drones for Biodiversity Conservation and Ecological Monitoring”. *Drones*, 2019. V. 3. P. 47. DOI: 10.3390/drones3020047.

Dubinina M., Lushchekina A., Radeloff V. Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? *Ecosystems*, 2011. V. 14. P. 547–562. DOI: 10.1007/s10021-011-9427-9.

Furukawa F., Laneng L. A., Ando H., Yoshimura N., Kaneko M., Morimoto J. Comparison of RGB and Multispectral Unmanned Aerial Vehicle for Monitoring Vegetation Coverage Changes on a Landslide Area. *Drones*, 2021. V. 5. P. 97. DOI: 10.3390/drones5030097.

Jaya N. M. P., Harmayani K. D., Widhiawati A. R., Atmaja G. S., Jaya M. W. Spatial Analysis of Vegetation Density Classification in Determining Environmental Impacts Using UAV Imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2022. V. V-3-2022. DOI: 10.5194/isprs-annals-V-3-2022-417-2022.

Khoroshev A. V., Kalmykova O. G., Dusaeva G. Kh. Evaluation of the Normalized Differential Vegetation Index as a Source of Information on Aboveground Phytomass in Steppes. *Earth Research from Space*, 2023. No. 3. P. 27–43 (in Russian). DOI: 10.31857/S020596142303003X.

- Larrinaga A. R., Brotons L.* Greenness Indices from a Low-Cost UAV Imagery as Tools for Monitoring Post-Fire Forest Recovery. *Drones*, 2019. V. 3. P. 6. DOI: 10.3390/drones3010006.
- Martinez J. L., Lucas-Borja M. E., Plaza-Alvarez P. A., Denisi P., Moreno M. A., Hernandez D., Gonzalez-Romero J., Zema D. A.* Comparison of Satellite and Drone-Based Images at Two Spatial Scales to Evaluate Vegetation Regeneration after Post-Fire Treatments in a Mediterranean Forest. *Applied Sciences*, 2021. V. 11. P. 5423. DOI: 10.3390/app11125423.
- Pavleychik V. M., Chibilev A. A., Padalko Yu. A.* Pyrological Situation in the Steppes of Northern Eurasia. *Doklady Earth Sciences*, 2022. V. 505. Part 2. P. 591–597. DOI: 10.1134/S1028334X22080141.
- Pavleichik V. M., Sivokhip Zh. T., Padalko Yu. A.* Regional Features of the Formation of Hydrological Conditions in the Steppes of Northern Eurasia Based on FIRMS Data. *InterCarto. InterGIS. Geoinformation Support for the Sustainable Development of Regions in a Crisis*. Moscow: Faculty of Geography of Moscow State University, 2023. V. 29. Part 1. P. 423–436 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-423-436.
- Pavleichik V. M., Yazykbaev E. R., Sivokhip Zh. T., Padalko Yu. A.* Features of the Formation and Implementation of Fire-Hazardous Situations in the Ural-Caspian Region During Abnormally Hot and Dry Years. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya “Nauki o Zemle”* (The Bulletin of Irkutsk State University. Series “Earth Sciences”), 2023. V. 43. P. 62–78 (in Russian). DOI: 10.26516/2073-3402.2023.43.62.
- Perez-Luque A. J., Ramos-Font M. E., Barbieri M. J. T., Perez C. T., Renta G. C., Cruz A. B. R.* Vegetation Cover Estimation in Semi-Arid Shrublands after Prescribed Burning: Field-Ground and Drone Image Comparison. *Drones*, 2022. V. 6. P. 370. DOI: 10.3390/drones6110370.
- Shinkarenko S. S., Bartalev S. A.* Analysis of the Influence of Species Composition, Projective Cover, and Phytomass of Arid Landscape Pasture Vegetation on Spectral Reflectance Properties Based on Ground Measurements. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2023. V. 20. No. 3. P. 176–192 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192.
- Shinkarenko S. S., Bartalev S. A.* Analysis of the Relationship Between Structural and Spectral-Reflective Characteristics of Vegetation in Arid Grassland Landscapes. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*, 2024. V. 21. No. 3. P. 171–187 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187.
- Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Doroshenko V. V., Naichuk Ya. A.* An Analysis of the Dynamics of Areas Affected by Steppe Fires in Western Kazakhstan on the Basis of Earth Remote Sensing Data. *Arid Ecosystems*, 2023. V. 13. No. 1. P. 29–38. DOI: 10.1134/S2079096123010122.
- Talucci A. C., Forbath E., Kropp H., Alexander H. D., DeMarco J., Paulson A. K., Zimov N. S., Zimov S., Loranty M. M.* Evaluating Post-Fire Vegetation Recovery in Cajander Larch Forests in Northeastern Siberia Using UAV Derived Vegetation Indices. *Remote Sensing*, 2020. V. 12. P. 2970. DOI: 10.3390/rs12182970.
-