

ПОДСПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ ДОНБАССА В МАЕ – ИЮНЕ 2024 г.

И.И. Стрельников, И.В. Шевердяев, А.А. Магаева

Донецкий ботанический сад, г. Донецк, ДНР
ivanstrel87@gmail.com; ig089@yandex.ru; a.magaeva@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты рекогносцировочной оценки возможности применения спектральных спутниковых вегетационных индексов NDVI и EVI для дистанционной оценки надземной фитомассы на фрагментированных и высокоурбанизированных территориях Донбасса. Проведен анализ видового состава и фитомассы на 47 опытных площадках, разбитых на 18 ландшафтных участках. Зафиксировано 206 видов травянистой растительности, относящихся к 17 порядкам и 31 семейству. Фитомасса варьируется в пределах от 124 до 609 г/м². Получены оценки вегетационных индексов NDVI и EVI по материалам спутниковой съемки Sentinel-2. Значения NDVI варьируются от 0,177 до 0,477, значения EVI – от 0,192 до 0,663. Между индексами наблюдается прямая корреляция. Базовый индекс NDVI проявляет лучшую связь с фитомассой участков, чем уточненный показатель EVI, из чего следует, что использование более сложных индексов (разные формы коррекции NDVI) для дистанционной оценки продуктивности сообществ может быть необоснованным. Связь фитомассы и NDVI является нелинейной – использование полиномиальной регрессии 3-й степени показывает статистически значимое улучшение оценки. Финальная модель позволяет объяснить 74 % дисперсии в данных о фитомассе. Такой показатель выглядит достаточным для грубой оценки продуктивности сообществ в региональном масштабе. Для улучшения качества оценок можно предложить включение в модели климатических переменных и топографических индексов, которые позволят учесть эффекты «выгорания» растительности.

Ключевые слова: NDVI, EVI, Sentinel-2, ДЗЗ, фитомасса, Донбасс.

Введение. Оценка надземной фитомассы (НФ) растительных сообществ имеет решающее значение для понимания динамики экосистем. НФ служит ключевым показателем здоровья растительности, потенциала секвестрации углерода и общей продуктивности экосистемы. Однако традиционные методы оценки фитомассы трудоемки, занимают много времени и зачастую нецелесообразны для больших или труднодоступных территорий. Решением этой проблемы могут выступать методы дистанционного зондирования, в частности использование нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) в качестве предиктора НФ [1].

Оценка НФ с помощью NDVI актуальна по нескольким причинам. Оценка фитомассы является неотъемлемой частью мониторинга запасов углерода, что крайне важно для понимания глобального углеродного цикла и обоснования стратегий смягчения последствий изменения климата [2]. Индекс NDVI, полученный по спутниковым снимкам, является надежным косвенным показателем состояния и продуктивности растительности, позволяя отслеживать изменения во времени

и на разных ландшафтах [3]. Это особенно ценно для степных экосистем, которые часто фрагментированы и находятся в уязвимом состоянии из-за изменений в землепользовании. Точная оценка фитомассы на этих территориях может стать руководством к действию по сохранению растительных сообществ и основой для практик экоцентричного менеджмента территорий [4].

В Донбассе, территории, характеризующейся высокой индустриализацией и значительной урбанизацией, естественные степные участки играют важнейшую роль в поддержании регионального биоразнообразия и экосистемных услуг. Эти ландшафты являются уязвимыми прежде всего из-за суровых климатических условий, поэтому дополнительное антропогенное воздействие резко повышает риски деградации. В связи с этим мониторинг НФ в степных районах необходим для оценки воздействия негативных факторов и координации усилий по экологическому восстановлению и защите территории. Кроме того, в высокоурбанизированном Донбассе, где землепользование часто диктуется промышленной деятельностью, понимание динамики фитомассы может помочь в раз-

работке экологической политики, направленной на повышение устойчивости ландшафтов.

Недавние исследования продемонстрировали полезность индекса NDVI для оценки НФ в различных экосистемах, включая луга, саванны и степные регионы [4; 5]. Однако применение NDVI в сильно фрагментированных ландшафтах, таких как степи Донбасса, требует тщательной калибровки и валидации, учитывая уникальные экологические условия и структуру землепользования в регионе. Исследования также подчеркивают необходимость интеграции NDVI с другими индексами дистанционного зондирования и экологическими переменными для повышения точности оценок фитомассы [6]. Несмотря на эти достижения, в литературе остается пробел в отношении конкретных проблем и методологий оценки фитомассы в высокоурбанизированных полуприродных степных регионах, что подчеркивает необходимость целенаправленных исследований в таких регионах, как Донбасс.

Цель работы – оценка возможности прямого моделирования надземной фитомассы природной и полуприродной травянистой растительности на территории Донбасса с использованием спутниковых вегетативных индексов. Для достижения цели решены следующие практические задачи: проведены точечные оценки надземной фитомассы травянистых сообществ в различных орографических условиях с региональным географическим охватом; выполнена статистическая оценка связи между показателями фитомассы и вегетационными индексами NDVI и EVI как двух индексов, наиболее часто используемых для подобных задач.

Материалы и методы. На 18 участках с различными ландшафтами заложено 47 площадок размером 1 м², на которых выполнен снос надземной фитомассы в период с 14 мая по 27 июня 2024 г. (рис. 1). Координаты площадок были определены с помощью навигатора гражданского уровня с усреднением минимум 100 последовательных показателей местоположения (оценочная точность привязки <2 м). Скошенная фитомасса была высушена, очищена от прошлогодних и частично разложившихся остатков растений и затем взвешена на лабораторных весах с точностью до 0,001 г. Процедура сушки заключалась в доведении фитомассы до воздушно-сухого состояния на воздухе с после-

дующим досушиванием 16 часов при 65 °С и 8 часов при 80 °С.

Для оценки фитомассы дистанционными методами применены вегетационные индексы NDVI [7] и EVI [8] как широко используемые в исследованиях растительного покрова по всему миру. Для расчетов были использованы данные спутниковых снимков Sentinel-2 за ближайшие к скосам даты: 7 и 12 мая, 11 и 21 июня, 1 июля 2024 г. Выбор спутниковых данных обусловлен высоким пространственным разрешением (10 м), использованием оптических и инфракрасного каналов, высокой частотой съемки (5–10 дней). Перед расчетом вегетационных индексов были рассчитаны значения спектральной яркости (СЯ) для каждого используемого канала, поскольку изначально спутниковые данные Sentinel-2 предоставляются в целочисленных значениях СЯ, помноженных на коэффициент 10 000.

Для расчета NDVI использовались каналы B04 и B08 по формуле (1), для EVI – B02, B04 и B08 по формуле (2):

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}, \quad (1)$$

$$EVI = \frac{2.5 * B08 - B04}{B08 + 6 * B04 - 7.5 * B02 + 1}. \quad (2)$$

Далее были рассчитаны средние арифметические значения, полученные со снимков с ближайшими к скосам датами, за исключением значений, искаженных облачностью.

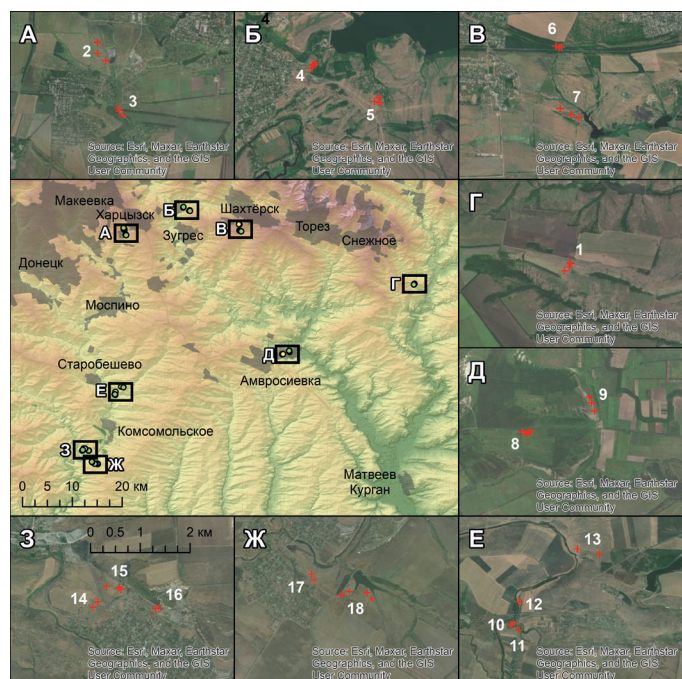


Рис. 1. Участки укосов фитомассы

Результаты и обсуждение. Отобранная сухая фитомасса варьируется в пределах от 124 до 609 г/м². На рассмотренных участках зафиксировано 206 видов травянистой растительности, относящихся к 17 порядкам и 31 семейству. В таблице 1 представлены 10 видов с наибольшей встречаемостью.

Таблица 1. Перечень видов с наибольшей встречаемостью на исследованных участках

Наименование	Порядок	Семейство	Вид	Встречаемость, %
Типчак	Poales	Poaceae	<i>Festuca valesiaca</i> Schleich. ex Gaudin	82,4
Люцерна желтая	Fabales	Fabaceae	<i>Medicago falcata</i> L.	64,7
Вьюнок полевой	Solanales	Convolvulaceae	<i>Convolvulus arvensis</i> L.	49,0
Пырей ползучий	Poales	Poaceae	<i>Elymus repens</i> (L.) Gould	47,1
Молочай степной	Malpighiales	Euphorbiaceae	<i>Euphorbia stepposa</i> Zoz ex Prokh.	47,1
Шалфей дубравный	Lamiales	Lamiaceae	<i>Salvia nemorosa</i> L.	45,1
Синеголовник полевой	Apiales	Apiaceae	<i>Eryngium campestre</i> L.	39,2
Ясменник распростертый	Gentianales	Rubiaceae	<i>Galium humifusum</i> M. Bieb.	39,2
Подорожник ланцетный	Lamiales	Plantaginaceae	<i>Plantago lanceolata</i> L.	39,2
Мятлик узколистный	Poales	Poaceae	<i>Poa angustifolia</i> L.	35,3

Значения NDVI варьируются от 0,177 до 0,477, значения EVI – от 0,192 до 0,663. На первом этапе провели оценку взаимосвязи EVI и NDVI. При этом преследовали цель дать оценку, насколько усложнение вегетационного индекса (NDVI более простой, EVI является его улучшенной версией) изменяет информацию, которую он представляет. Кроме того, такой анализ позволяет сформировать стратегию для дальнейшего моделирования. Так, если показатели индексов различаются в значительной степени, то для моделирования фитомассы можно протестировать модели с двумя независимыми переменными вида: (фитомасса ~ NDVI + EVI). Если же различия индексов незначительны, то добавление второго индекса в модель не только не приведет к улучшению результата, но и вызовет нежелательные эффекты коллинеарности предикторов. Для решения этих задач была построена линейная модель (рис. 2), оцененная с помощью OLS (формула: $EVI \sim NDVI$). Модель объясняет статистически значимую и существенную часть дисперсии ($R^2 = 0,89$, $F_{(1,39)} = 316,38$, $p < 0,001$, $adj. R^2 = 0,89$). Пересечение модели, соответствующее $NDVI = 0$, составляет $-0,02$ (95 %-ный доверительный интервал (далее ДИ) $[-0,07, 0,02]$,

$t(39) = -1,03$, $p = 0,308$). В рамках этой модели эффект NDVI статистически значим и положителен (коэффициент при $NDVI = 1,23$, 95 % ДИ $[1,09, 1,37]$, $t(39) = 17,79$, $p < 0,001$; стандартизированный коэффициент = 0,94, 95 % ДИ $[0,84, 1,05]$). Здесь и далее стандартизированные параметры были получены путем подгонки модели к стандартизированной версии набора данных. Стандартизированное значение коэффициента отображает изменение зависимой переменной в ответ на изменение предиктора на 1 единицу стандартного отклонения. 95 %-ные доверительные интервалы и p -значения были рассчитаны с использованием аппроксимации t -распределения Вальда.

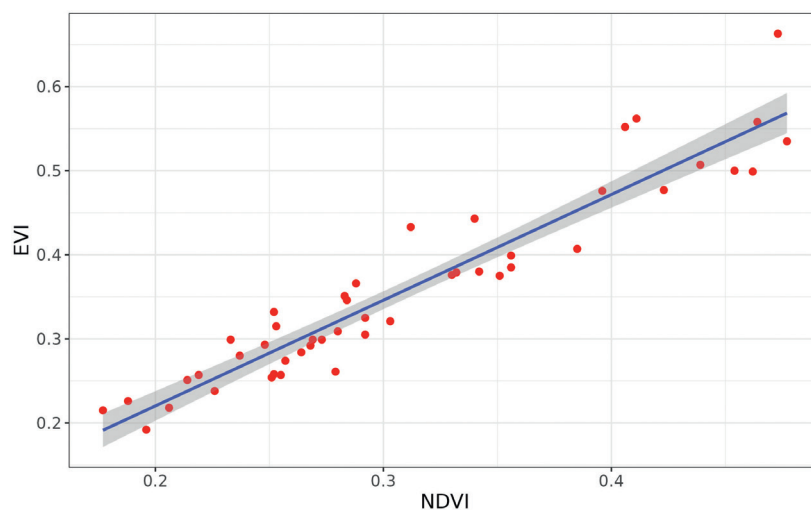


Рис. 2. Сопоставление полученных значений NDVI и EVI. Область, закрашенная серым, – 95 %-ный доверительный интервал линейной модели

Анализ показал, что оба индекса демонстрируют высокую корреляцию. Следовательно, более сложный индекс EVI на исследуемой территории не несет существенной дополнительной информации о состоянии растительности по сравнению с индексом NDVI. В связи с этим в качестве дальнейшей стратегии моделирования были выбраны простые модели с единственным предиктором: фитомасса ~ NDVI или фитомасса ~ EVI.

Для оценки связи между показателями фитомассы и NDVI была построена линейная модель

(формула: фитомасса ~ NDVI, рис. 3), которая объясняет статистически значимую и значительную долю дисперсии ($R^2 = 0,65$, $F_{(1,39)} = 73,67$, $p < 0,001$, $\text{adj. } R^2 = 0,64$). Пересечение модели, соответствующей NDVI = 0, находится на уровне $-111,46 \text{ г/м}^2$ (95 % ДИ $[-199,91, -23,00]$, $t(39) = -2,55$, $p = 0,015$). В рамках этой модели эффект NDVI статистически значим и положителен (коэффициент при NDVI = $1214,13$, 95 % ДИ $[928,00, 1500,25]$, $t(39) = 8,58$, $p < 0,001$; стандартизированный коэффициент = $0,81$, 95 % ДИ $[0,62, 1,00]$).

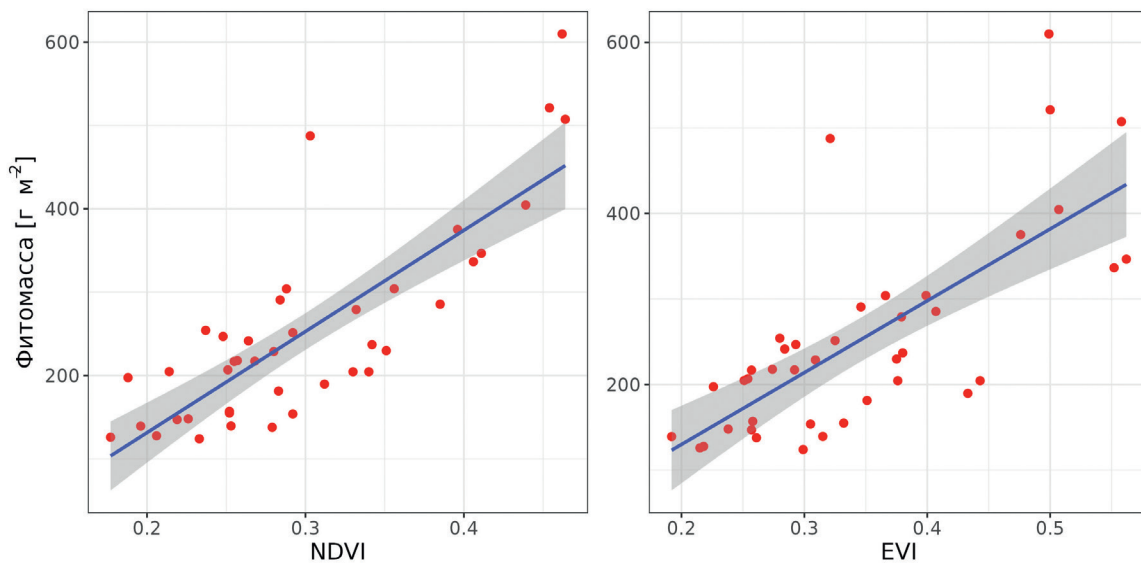


Рис. 3. Связь вегетационных индексов и фитомассы.
Область, закрашенная серым, – 95 %-ный доверительный интервал линейной модели

Следует отметить, что перед построением модели было произведено отсеивание выбросов, так как в некоторых скопах присутствовали растения с развитыми корневищами или утолщенными основаниями стеблей, выступающими над поверхностью, и показатели биомассы оказывались диспропорциональными относительно фотосинтезирующей биомассы. Кроме того, следует учесть, что в период сбора материала наблюдалась аномальная засуха, в результате чего растительность на некоторых участках была полностью засохшей. То есть материал содержал некоторую фитомассу, но не содержал зеленых частей, которые давали бы отклик вегетационных индексов. Выявление выбросов было основано на дистанциях Кука при построении линейной модели на всех точках данных, пороговое значение приняли равным $4 / N$, где N = количество наблюдений. В результате дан-

ной процедуры были отброшены 7 точек. В дальнейшем данная особенность, а именно присутствие запасующих органов в скопах, должно быть учтено. На данном этапе мы приняли решение отделять корневища от надземной фитомассы, даже если они выступают над поверхностью почвы. Кроме того, в дальнейшем планируется добавить в модели показатели депривации влаги, которые, возможно, позволят учесть эффекты «выгорания» растительности в засушливый период.

Далее выполнена оценка связи фитомассы и индекса EVI. Для этого построили аналогичную модель, в которой независимой переменной выступал индекс EVI (формула: фитомасса ~ EVI). Данная модель так же объясняет значительную долю дисперсии, но показатели качества подгонки существенно ниже, чем у модели с NDVI ($R^2 = 0,53$, $F_{(1,39)} = 43,84$, $p < 0,001$, $\text{adj. } R^2 = 0,52$).

В частности, R^2 оказался на 12 % меньше, а сумма квадратов остатков выросла на 68 088 единиц; с 189 117 в случае NDVI до 257 205 для EVI. Таким образом, использование более сложного индекса выглядит необоснованным. Для территории Донбасса NDVI демонстрирует более точные оценки биомассы.

Визуальное инспектирование диагностических графиков модели фитомасса \sim NDVI, показало, что остатки модели имеют распределение, отличное от нормального, а общий вид отношения «остатки модели \sim предсказанные значения» дает повод предположить нелинейность связи. Поэтому мы приняли решение дополнительно протестировать возможную нелинейность отношения фитомассы к NDVI. Для этого построили полиномиальную линейную регрессию (метод наименьших квадратов, рис. 4). Общая формула: фитомасса \sim NDVI³ + NDVI² + NDVI. Модель объясняет статистически значимую и значительную долю дисперсии ($R^2 = 0,74$, $F(3,37) = 35,02$, $p < 0,001$, adj. $R^2 = 0,72$). В таблице 2 представлены коэффициенты полиномиальной линейной модели, а также их оценки, 95 %-ные доверительные интервалы, t -значения, p -значения и стандартизированные коэффициенты.

Пересечение модели представляет собой предсказанное значение фитомассы, когда NDVI равен 0. Коэффициенты NDVI представляют собой изменения в предсказанной биомассе при изменении NDVI на одну единицу в каждой

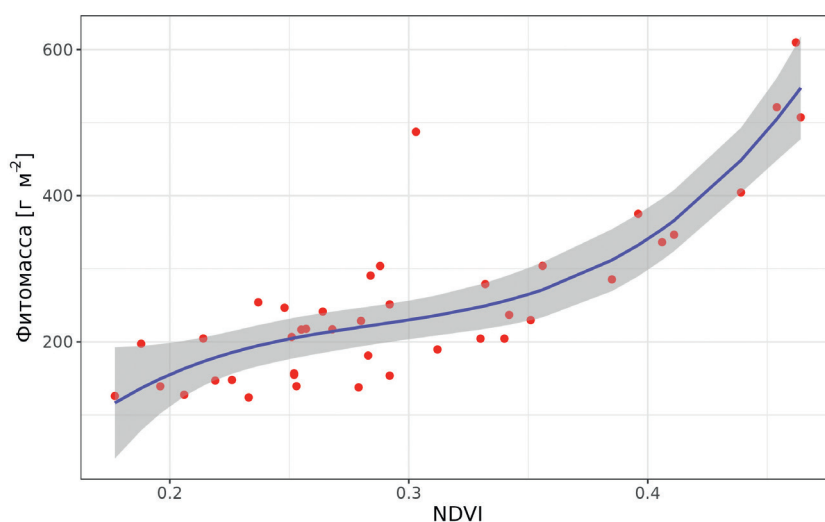


Рис. 4. Связь NDVI и фитомассы для отфильтрованных точек

степени (1, 2 и 3-я). Стандартизированные коэффициенты представляют собой изменение в единицах стандартного отклонения зависимой переменной (фитомасса) на одно стандартное отклонение изменения независимой переменной (NDVI) на каждой степени. Таким образом, полиномиальная модель продемонстрировала улучшение качества подгонки. Для тестирования значимости этого улучшения мы провели дисперсионный анализ (ANOVA) двух моделей. Результаты показали значительное улучшение соответствия модели при включении полиномиального члена ($F_{(2,37)} = 6,09$, $p = 0,005$). Из чего следует, что нелинейная зависимость, отражаемая полиномиальными членами, объясняет большую дисперсию биомассы по сравнению с линейной моделью. В конечном итоге мы можем рекомендовать именно этот вид модели для базового моделирования продуктивности травянистой растительности на территории Донбасса.

Таблица 2. Коэффициенты и соответствующие показатели полиномиальной регрессионной модели связи фитомассы с NDVI

Параметр	Коэффициент	95 % ДИ	t -значение	p -значение	Стандартизированный коэффициент
Пересечение	252,10	[232,48, 271,72]	26,03	<0,001	–
NDVI [1-я степень]	597,68	[472,03, 723,33]	9,64	<0,001	5,11 [4,04, 6,19]
NDVI [2-я степень]	173,57	[47,93, 299,22]	2,80	0,008	1,49 [0,41, 2,56]
NDVI [3-я степень]	129,24	[3,60, 254,89]	2,08	0,044	1,11 [0,03, 2,18]

Заключение. В ходе начального этапа реализации проекта по анализу продуктивности травянистых сообществ Донбасса проведен анализ видового состава и фитомассы на 47 опытных площадках, разбитых на 18 ландшафтных участках. Получены оценки вегетационных индексов NDVI и EVI. Анализ зависимостей между фактической удельной фитомассой и спутниковыми индексами, проведенный методами линейной регрессии, позволил сделать ряд выводов. Прежде всего, базовый индекс NDVI проявляет лучшую связь с биомассой участков, чем уточненный показатель EVI, из чего следует, что использование более сложных индексов (разные формы коррекции

NDVI) для дистанционной оценки продуктивности сообществ может быть необоснованным. Связь биомассы и NDVI является нелинейной, так, использование полиномиальной регрессии 3-й степени показывает статистически значимое улучшение оценки. Финальная модель позволяет объяснить 74 % дисперсии в данных о биомассе. Такой показатель выглядит достаточным для грубой оценки продуктивности сообществ в региональном масштабе. Для улучшения качества оценок можно предложить включение в модели климатических переменных и топографических индексов, которые позволят учесть эффекты «выгорания» растительности.

Публикация подготовлена в рамках государственной темы Донецкого ботанического сада «Классификация почвенно-растительного покрова с помощью методов дистанционного зондирования», № FREG-2024-0001.

Список литературы

1. Liu S., Cheng F., Dong S., Zhao H., Hou X., Wu X. Spatiotemporal dynamics of grassland aboveground biomass on the Qinghai-Tibet Plateau based on validated MODIS NDVI // Scientific reports. 2017. 7(1). P. 4182. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04038-4>.
2. Baccini A., Goetz S.J., Walker W.S., Laporte N.T., Sun M., Sulla-Menashe D., Hackler J., Beck P.S.A., Dubayah R., Friedl M.A., Samanta S., Houghton R.A. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps // Nature Climate Change. 2012. 2(3). P. 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>
3. Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M., Tucker C.J., Stenseth N.C. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // Trends in Ecology & Evolution. 2005. 20(9). P. 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>.
4. Marino S., Brugiapaglia E., Miraglia N., Persichilli C., de Angelis M., Pilla F., di Brita A. Modelling of the above-ground biomass and ecological composition of semi-natural grasslands on the strenght of remote sensing data and machine learning

algorithms // Ecological Informatics. 2024. P. 102740. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102740>.

5. Wang G., Liu S., Liu T., Fu Z., Yu J., Xue B. Modelling above-ground biomass based on vegetation indexes: a modified approach for biomass estimation in semi-arid grasslands // International Journal of Remote Sensing. 2019. 40(10). P. 3835–3854. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1553319>.

6. John R., Chen J., Giannico V., Park H., Xiao J., Shirkey G., Ouyang Z., Shao C., Laforteza R., Qi J. Grassland canopy cover and aboveground biomass in Mongolia and Inner Mongolia: Spatiotemporal estimates and controlling factors // Remote Sensing of Environment. 2018. 213. P. 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.002>.

7. Landsat Normalized Difference Vegetation Index. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index> (дата обращения: 15.07.2024).

8. Landsat Enhanced Vegetation Index. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index> (дата обращения: 15.07.2024).

SUBSATELLITE FIELD MEASUREMENTS OF VEGETATION COVER IN THE DONBASS IN MAY–JUNE 2024

I.I. Strelnikov, I.V. Sheverdyayev, A.A. Magaeva

Donetsk Botanical Garden. Donetsk, Donetsk
ivanstrel87@gmail.com; ig089@yandex.ru; a.magaeva@mail.ru

Abstract. The paper presents the results of a reconnaissance assessment of the possibility of using spectral satellite vegetation indices NDVI and EVI for remote assessment of above-ground biomass in fragmented and highly urbanized areas of Donbass. An analysis of species composition and phytomass was carried out at 47 experimental sites divided into 18 landscape areas. 206 species of herbaceous vegetation belonging to 17 orders and 31 families have been recorded. Phytomass varies from 124 to 609 g/m². Estimates of the vegetation indices NDVI and EVI were obtained based on Sentinel-2 satellite imagery. NDVI values range from 0.177 to 0.477, EVI values range from 0.192 to 0.663. There is a direct correlation between the indices. The basic NDVI index shows a better relationship with the biomass of sites than the refined EVI index, which means that the use of more complex indices (various forms of NDVI correction) for remote assessment of community productivity may be unjustified. The relationship between biomass and NDVI is non-linear, so the use of 3rd degree polynomial regression shows a statistically significant improvement in the estimate. The final model explained 74 % of the variance in the biomass data. This indicator seems sufficient for a rough assessment of the productivity of communities on a regional scale. To improve the quality of assessments, it is possible to propose the inclusion of climate variables and topographic indices in the models, which will take into account the effects of “burning out” of vegetation.

Keywords: NDVI, EVI, Sentinel-2, remote sensing, phytomass, Donbass.

References

1. Liu S., Cheng F., Dong S., Zhao H., Hou X., Wu X. 2017. Spatiotemporal dynamics of grassland aboveground biomass on the Qinghai-Tibet Plateau based on validated MODIS NDVI. *Scientific reports*. 7(1): 4182. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04038-4>.
2. Baccini A., Goetz S.J., Walker W.S., Laporte N.T., Sun M., Sulla-Menashe D., Hackler J., Beck P.S.A., Dubayah R., Friedl M.A., Samanta S., Houghton R.A. 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*. 2(3): 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>.
3. Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A., Gaillard J.M., Tucker C.J., Stenseth N.C. 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*. 20(9): 503–510. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>.
4. Marino S., Brugiapaglia E., Miraglia N., Persichilli C., de Angelis M., Pilla F., di Brita A. 2024. Modelling of the above-ground biomass and ecological composition of semi-natural grasslands on the strength of remote sensing data and machine learning algorithms. *Ecological Informatics*. 102740. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102740>.
5. Wang G., Liu S., Liu T., Fu Z., Yu J., Xue B. 2019. Modelling above-ground biomass based on vegetation indexes: a modified approach for biomass estimation in semi-arid grasslands. *International Journal of Remote Sensing*. 40(10): 3835–3854. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1553319>.
6. John R., Chen J., Giannico V., Park H., Xiao J., Shirkey G., Ouyang Z., Shao C., Laforteza R., Qi J. 2018. Grassland canopy cover and aboveground biomass in Mongolia and Inner Mongolia: Spatiotemporal estimates and controlling factors. *Remote Sensing of Environment*. 213: 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.002>.
7. Landsat Normalized Difference Vegetation Index. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index> (accessed 15 July 2024).
8. Landsat Enhanced Vegetation Index. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-enhanced-vegetation-index> (accessed 15 July 2024).