

**И.И. Стрельников, Ю.В. Ибатулина, А.А. Мarmorштейн,
А.В. Клюкина**

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЬЕФА КАК ФАКТОРЫ ВАРИАЦИИ NDVI ТРАВЯНЫХ СООБЩЕСТВ ДОНБАССА

*Федеральное государственное научное учреждение
«Донецкий ботанический сад»*

Проанализировано влияние топографических метрик (TPI, TRI, VRM, уклон, аспект) на продуктивность травяных сообществ Донбасса, измеряемую через NDVI. Хотя все метрики показали статистическую значимость, их вклад в объяснение вариации NDVI оказался невысоким (максимум 3,17 % для TPI). Результаты подтверждают необходимость использования многофакторных моделей для более точной оценки продуктивности, учитывая сложные взаимодействия между топографическими и другими экологическими факторами.

Ключевые слова: NDVI, цифровая модель рельефа, морфологический анализ рельефа

Цитирование: Стрельников И.И., Ибатулина Ю.В., Мarmorштейн А.А., Клюкина А.В. Морфологические характеристики рельефа как факторы вариации NDVI травяных сообществ Донбасса // Промышленная ботаника. 2024. Вып. 24, № 4. С. 100–108. DOI: 10.5281/zenodo.14638338

Введение

Травяные экосистемы играют важнейшую роль в поддержании биоразнообразия, связывании углерода и предоставлении экосистемных услуг, таких как сохранение почвы и обеспечение корма для скота. Понимание факторов, влияющих на их продуктивность, имеет жизненно важное значение, особенно в условиях меняющегося климата и антропогенного влияния. В степных районах Донбасса, характеризующихся засушливыми условиями, продуктивность природных и полуприродных травяных сообществ часто ограничивается доступностью влаги и зависит от морфологии рельефа, которая влияет на характер стока воды, эрозию почвы и распределение питательных веществ.

Цифровые модели рельефа (далее – ЦМР) и их производные, такие как индекс топографического положения (TPI), индекс пересеченности местности (TRI), крутизна, экспозиция и векторная мера пересеченности (VRM), широко используются для количественной

оценки морфологии рельефа. Эти метрики помогают определить микромасштабные и мезомасштабные изменения среды обитания, которые, в свою очередь, влияют на растительность. Например, TPI определяет геоморфологические особенности, такие как долины и хребты, а TRI и уклон указывают на неровности ландшафта и водоудерживающие зоны. Такие топографические атрибуты все чаще используются для прогнозирования продуктивности растительности, особенно в паре с данными дистанционного зондирования, такими как нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) [4, 11].

NDVI хорошо зарекомендовал себя как косвенный дистанционный показатель фотосинтетической активности и биомассы сообществ. Наилучшая эффективность оценок биомассы по NDVI достигается при измерении на фенологических пиках, при наибольшем обилии зеленой фитомассы. Этот подход был подтвержден в

исследованиях травяных экосистем умеренной зоны [1]. Однако потенциал NDVI для оценки микротопографических влияний на продуктивность в конкретных степных регионах, таких как Донбасс, остается недостаточно изученным.

Исследования взаимодействия между морфологией рельефа и продуктивностью экосистем выявили значимость таких факторов, как градиенты солнечной радиации, перераспределение влаги и воздействие ветра, которые зависят от высоты и крутизны склона. Кроме того, экспозиция склонов влияет на тепловые и гидрологические условия, создавая микроклимат, который может либо усиливать, либо сдерживать рост растительности [3, 8]. Эти взаимосвязи хорошо задокументированы в саваннах, тундрах и альпийских лугах, в то время как степной биом, особенно в Восточной Европе, был относительно обойден вниманием в этой области исследований.

Значительная проблема заключается в интеграции атрибутов рельефа в нескольких пространственных масштабах для отражения факторов продуктивности, действующих на разных расстояниях. Локальные особенности, такие как небольшие впадины, могут влиять на накопление влаги, в то время как более масштабные закономерности, такие как экспозиция склонов, влияют на инсоляцию. Достижения в области дистанционного зондирования и геопространственного анализа предоставляют инструменты для решения этой сложной задачи, но требуют дополнительных исследований для учета уникальных характеристик степных экосистем [10].

Цель и задачи исследований

Цель исследования – оценить влияние морфологических характеристик рельефа, рассчитанных на основе ЦМР, на пространственную вариацию NDVI травяных сообществ Донбасса, рассматривая этот индекс как показатель, связанный с продуктивностью природных и полуприродных экосистем. Задачей работы является статистическая оценка связей между значениями NDVI на фенологических пиках с многомасштабными топографическими индексами. Исследование направлено на устранение пробелов в понимании причинно-следственных связей,

определяющих пространственную структуру NDVI и связанных с ним характеристик продуктивности степных ландшафтов.

Объекты и методики исследований

Исследование проводили в регионе, определенном координатами 46.83564° с.ш., 36.17867° в.д., 50.55229° с.ш., 40.54933° в.д.

Значения нормализованного разностного индекса растительности (NDVI) были получены из набора данных Sentinel-2 Level-2A Harmonized Surface Reflectance dataset (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) с помощью Google Earth Engine (GEE). Изображения были выбраны около 28 мая 2024 года, чтобы зафиксировать пик фотосинтезирующей биомассы. Для обеспечения репрезентативности выборки было создано 10000 случайных точек на участках естественных и полустепных травяных сообществ, определенных на основе набора данных типизации почвенного покрова ESA WorldCover (версия 2.0).

Данные о рельефе были получены из цифровой модели рельефа (ЦМР) FABDEM (Copernicus DEM с удаленными деревьями и зданиями) [5]. ЦМР была предварительно обработана и использована в качестве исходных данных для анализа рельефа. Морфологические характеристики были рассчитаны с помощью Системы автоматизированного геоанализа (SAGA GIS). Для получения показателей, связанных с рельефом, был использован комплексный рабочий процесс.

Крутизна и экспозиция склона рассчитывались с помощью полиномиального метода 3-го порядка SAGA GIS (ta_morphometry 0). Значения экспозиции были переклассифицированы в категориальные коэффициенты на основе диапазонов азимутов для представления различных ориентаций.

Многомасштабный индекс топографического положения (mTPI). Был получен с помощью модуля ta_morphometry 28 в SAGA GIS [7].

Индекс пересеченности рельефа (TRI). Рассчитан для радиусов 3, 5 и 7 клеток с помощью модуля ta_morphometry 16 в SAGA с применением сглаживания, взвешенного по расстоянию [6].

Векторная мера изрезанности (VRM). Рассчитан для тех же радиусов, что и TRI, с помощью модуля `ta_morphometry` 17 в SAGA, что позволяет проводить многомасштабный анализ шероховатости рельефа [2].

Все метрики были преобразованы в формат GeoTIFF с помощью инструментов GDAL для облегчения дальнейшей обработки.

Морфологические метрики извлекались в тех же точках, где были получены значения NDVI. Это обеспечивало пространственное соответствие между вегетационными индексами и особенностями рельефа.

Статистический анализ производили в среде языка программирования R. Для оценки взаимосвязи между NDVI и морфологическими метриками использовали обобщенные аддитивные модели (GAM), в реализации пакета `mgcv` [9]. Результаты моделирования включали оценки доли объясненной дисперсии и статистической значимости каждого фактора. На основе этих результатов была получена относительная значимость факторов рельефа и их относительное влияние на изменчивость NDVI.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе работы произвели выборку 10000 случайных точек в пределах участков природной и полуприродной травяной растительности (границы участков установлены по набору данных ESA WorldCover V. 2). Для каждой точки экстрагированы значения нормализованного разностного индекса растительности NDVI в даты, близкие к 28 мая 2024 года (дата, для которой наблюдаются максимальные годовые значения NDVI в среднем по территории исследования). Данный индекс пропорционален количеству хлорофилла на единицу поверхности и принимает значения от -1 (полное отсутствие растений) до 1 (сплошной покров здоровой растительности). Минимальное значение в полученной выборке составило $-0,332$, максимальное – $0,925$. Среднее значение – $0,582$.

На втором этапе работы произвели расчет метрик, характеризующих морфологию рельефа. Основой для расчетов использовали

данные цифровой модели рельефа FABDEM V 1.2.

Крутизна склона представляет собой наклон поверхности, в нашем случае выраженный в радианах относительно горизонтали. Играет важную роль в экологических процессах, таких как сток воды, эрозия почвы и рост растительности, поскольку влияет на дренаж и доступность питательных веществ. В рамках работы мы исходим из предположения, что более крутые склоны обеспечивают меньшую продуктивность сообществ.

Экспозиция склона – это направление склона, в нашем случае измеренное в радианах, по отношению к северу. Влияет на микроклиматические условия, такие как освещенность и связанный с ней температурный режим. Теоретически, южные склоны наиболее благоприятны с точки зрения инсоляции. Но в засушливых условиях южная экспозиция может быть связана с недостатком влаги, поэтому в качестве теоретического ожидания принимали версию, что продуктивность южных склонов может быть низкой.

Индекс пересеченности рельефа (TRI или ИПР) определяет неровность рельефа путем измерения изменчивости высоты в пределах определенной окрестности вокруг каждой точки. Более высокие значения TRI указывают на более пересеченные, грубые ландшафты, такие как скалы или скальные обнажения, в то время как более низкие значения соответствуют более гладким местностям, таким как равнины. Как и в случае с крутизной предполагали, что TRI связан с продуктивностью обратно пропорционально. Для учета разных масштабов воздействия, рассчитывали TRI на разных радиусах: 90, 150 и 210 м, от искомой точки.

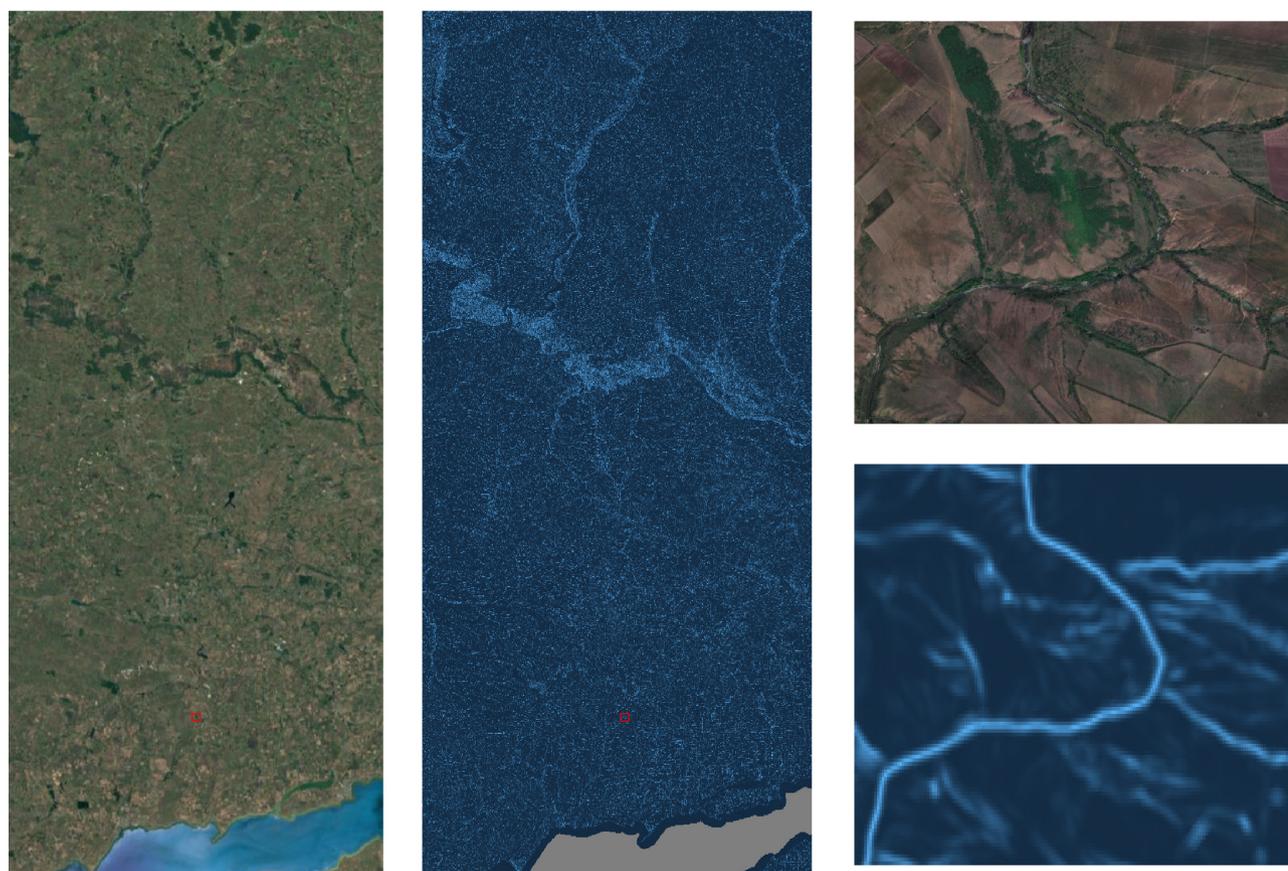
Индекс топографического положения (TPI или ИТП) определяет относительное положение места в ландшафте, сравнивая его высоту со средней высотой окружающей местности. Положительные значения указывают на хребты или вершины холмов, отрицательные – на долины или впадины, а значения, близкие к нулю, – на плоские участки. TPI играет важную роль в определении особенностей ландшафта и

понимании водных потоков, отложения осадочных пород и растительной зональности. В данной работе использовали многомасштабную версию индекса – вариант, в котором индекс рассчитывается для разных радиусов вокруг точки, после чего суммируется, тем самым интегрируя влияние как микроформ рельефа, так и более крупных форм (максимальный радиус учета = 240 м).

Мера векторной пересеченности (VRM или МВП) обеспечивает многомасштабную меру шероховатости поверхности, анализируя ориентацию рельефа в трех измерениях. В отличие от TRI, которая фокусируется исключительно на разнице высот, VRM учитывает

изменчивость крутизны и экспозиции, предлагая более полное представление о сложности рельефа. Эта метрика особенно ценна для изучения местообитаний, зависящих от микротопографических изменений, например, тех, на которые влияет тень или воздействие ветра. Как и в случае с TRI, для учета зависимости метрики от масштаба использовали три радиуса для оценки.

В качестве иллюстрации, на рисунке 1 представлено графическое отображение индекса VRM с радиусом расчета 90 м. В таблице 1 предоставлена сводка, описывающая распределение значений рассчитанных индексов для территории исследования.



Мера векторной пересеченности 3x3 0.00 0.25 0.50 0.75

Рис. 1. Отображение распределения показателей Меры векторной пересеченности ландшафта (VRM) с радиусом оценки 90 м, вместе с отображением снимков той же территории в реальных цветах. Левые колонки – мелкий масштаб, правые панели – увеличенный участок

Fig. 1. Display of the distribution of Vector Ruggedness Measure (VRM) indicators (radius of evaluation is 90 m) with a display of real-colour images of the same area. Left columns are small scale, right panels are enlarged area

Таблица 1. Характеристики распределения значений морфологических метрик рельефа на территории исследования

Метрика	Минимум	1-я квартиль	Медиана	Среднее	3-я квартиль	Максимум
Экспозиция (радиан)	0	1,73	3,34	3,26	4,84	6,28
Крутизна (радиан)	0	0,03	0,06	0,10	0,13	1,19
Индекс пересеченности рельефа 90 м	0	0,39	0,79	1,17	1,52	23,09
Индекс пересеченности рельефа 150 м	0	0,67	1,32	1,86	2,46	36,71
Индекс пересеченности рельефа 210 м	0	0,96	1,83	2,49	3,34	42,11
Мера векторной пересеченности 90 м	0	0,01	0,04	0,12	0,16	1,00
Мера векторной пересеченности 150 м	0	0,03	0,10	0,18	0,26	1,00
Мера векторной пересеченности 210 м	0	0,06	0,15	0,22	0,33	1,00
Многомасштабный TPI	-34,29	-0,26	0,03	0,01	0,37	28,03
Высота над уровнем моря (м)	-43,77	96,44	139,67	133,94	173,65	360,56

Из данных таблицы можно заключить, что распределение большинства метрик являются сильно асимметричными (большие различия между медианой, максимумом и минимумом), что дополнительно усложняет дальнейший анализ.

На финальном этапе работы последовательно исследовали потенциальный вклад каждой из метрик морфологии рельефа в формирование продуктивности травяных сообществ. Так как аппроксимацией биомассы считали NDVI, то фактически, проводили регрессионный анализ, в котором зависимой переменной выступали значения NDVI, а независимыми переменными – метрики. Из-за асимметрии, наблюдаемой в распределениях данных, и на основе визуального осмотра тенденций мы выбрали методы нелинейного моделирования. В частно-

сти, мы использовали обобщенные аддитивные модели (GAM), которые позволяют оценивать взаимосвязи между переменными путем применения сглаженных функций для эффективного отражения нелинейных закономерностей.

Для наглядности мы проиллюстрируем структуру анализа на примере многомасштабного индекса топографического положения TPI. Для моделирования мы использовали обобщенную аддитивную модель (GAM) со следующей формулой:

$$NDVI \sim s(TPI, bs=cs, k=7)$$

Здесь $s(TPI)$ представляет собой сглаженную функцию, примененную к переменной TPI (многомасштабный индекс топографического положения). Аргумент $bs=cs$ указывает на использование кубических сплайнов для сглажи-

вания, которые хорошо подходят для отражения нелинейных зависимостей. Параметр $k=7$ задает максимальное количество используемых базисных функций, контролируя гладкость и предотвращая переобучение. Такой подход позволяет моделировать потенциально сложную связь между NDVI и высотой над уровнем моря, сохраняя при этом интерпретируемость.

Графическое отображение зависимости между TPI и NDVI представлено на рисунке 2.

В данном случае можно констатировать, что отрицательные значения TPI (локальные углубления рельефа) сказываются на NDVI положительным образом, что может быть связано с лучшим гидрологическим режимом в депресси-

ях рельефа, а также защитой от ветра. В районе значений TPI около 0 наблюдается скачок ожидаемых значений, видимо связанный с переходом от плоского рельефа к склонам. Максимальные значения TPI, которые соответствуют локальным пикам или хребтам рельефа, ожидаемо ассоциируются с минимальными значениями NDVI.

При этом, важной характеристикой такой модели является р-значение, которое отображает уверенность в том, что связь между фактором и NDVI является закономерностью и не является продуктом случайности. Крайне низкое р-значение, значительно ниже порога 0,05, указывает на статистически значимую связь

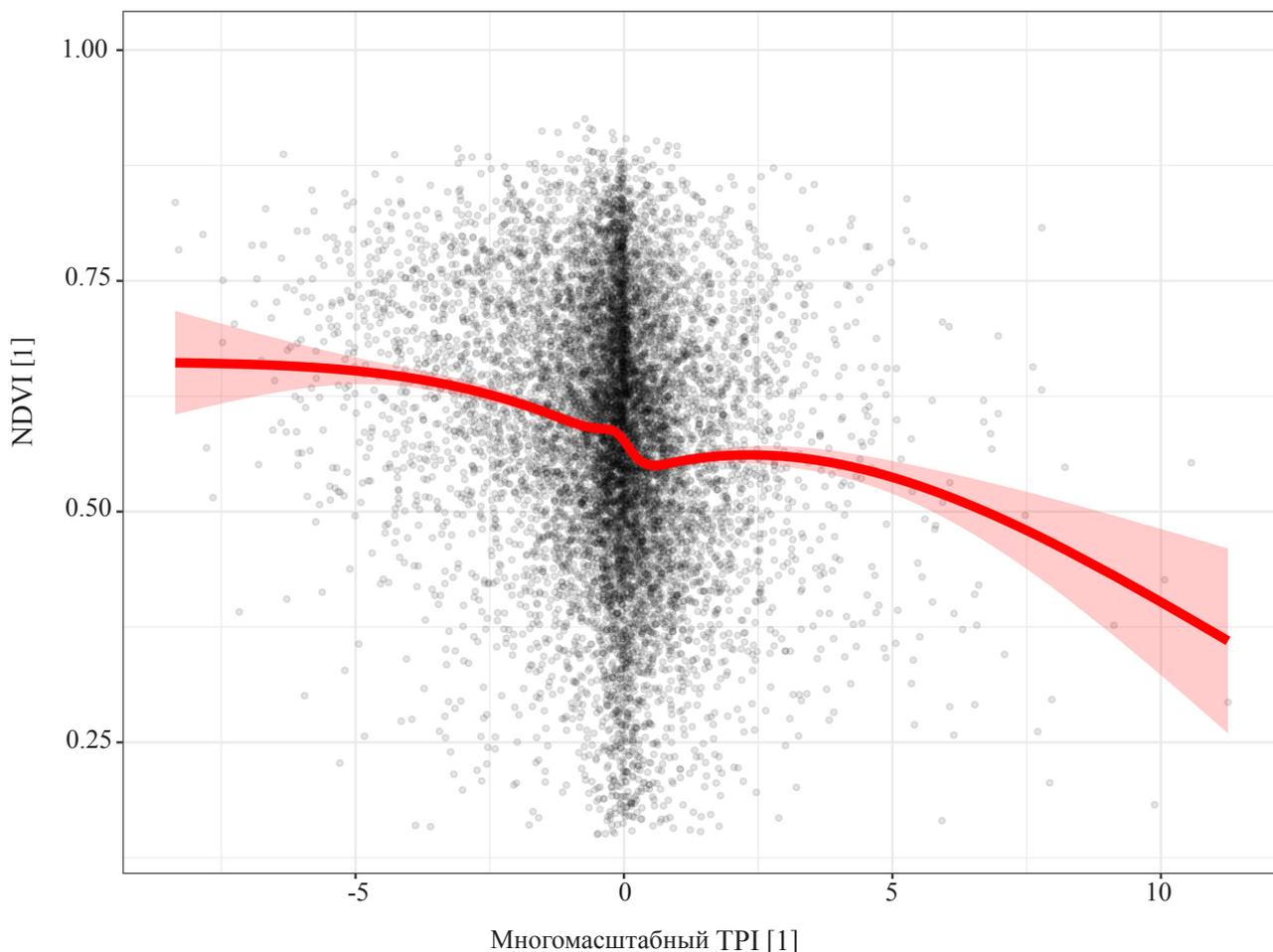


Рис. 2. Графическое отображение зависимости NDVI от многомасштабного индекса топографического положения. Красная линия отображает подгонную сглаженную линию регрессионной модели, закрашенная область отображает 95 % доверительный интервал

Fig. 2. Graphical representation of the dependence of NDVI on the multiscale Topographic Position Index (TPI). The red line shows the fitted smoothed line of the regression model, the shaded area shows the 95 % confidence interval

между TPI и NDVI. Это говорит о том, что наблюдаемая связь между TPI и NDVI является стабильной и маловероятно является следствием случайного совпадения.

Второй ключевой характеристикой модели является доля объясненной дисперсии, которая отражает хорошую согласованность модели. В данном случае объясненная дисперсия составляет всего 3,17 %. Это означает, что, хотя TPI оказывает статистически значимое влияние на NDVI, его вклад в общую вариацию NDVI относительно невелик. Такая низкая доля объясненной дисперсии указывает на то, что другие факторы, не включенные в данную модель, могут оказывать большее влияние на закономерности NDVI.

В таблице 2 представлена сводка результатов остальных индивидуальных моделей связи NDVI с метриками рельефа.

Из представленных результатов можно заключить, что ни один из факторов не проявил существенную долю объясненной вариации. Таким образом, ни одна из индивидуальных переменных не является доминирующим фактором, предопределяющим продуктивность сообществ. При этом все переменные оказались статистически значимыми. Таким образом, у нас нет сомнений в том, что переменные действительно влияют на NDVI.

Переменной с самым большим влиянием оказался индекс топографического положения. Переменная с минимальным влиянием – чистая высота над уровнем моря. В отношении метрик пересеченности рельефа (TRI и VRM) можно заключить, что TRI с радиусом учета окружения в 90 м оказалась наиболее информативным предиктором. Можно предположить, что в дальнейшем именно этой переменной можно отдавать предпочтение при выборе метрик сложности ландшафта. При этом визуальная оценка графиков показала, что низкие значения TRI ассоциируются с высокими значениями NDVI (продуктивность выше на более ровных участках). С ростом TRI значения NDVI резко падают, после чего практически не изменяются.

Несколько неожиданной оказалась низкая объясняющая способность переменной экспозиции склона. Визуальная оценка графиков связи указывает, что минимальные значения NDVI характерны как для южной, так и для северной экспозиции. В данном случае можно предположить, что на северных склонах негативное влияние оказывает снижение освещенности, а на южных – избыточная температура. Все же эта переменная представляет ценность, так как менее связана с локальными перепадами высот, а, следовательно, содержит информацию, отличающуюся от остальных метрик.

Таблица 2. Параметры качества подгонки регрессионных моделей зависимости NDVI от индивидуальных метрик

Метрика	edf	F-статистика	p-значение	dev
Высота над уровнем моря	5,732	7,191	> 0,0001	0,45 %
Многомасштабный TPI	5,922	53,675	> 0,0001	3,17 %
TRI 90 m	5,802	29,813	> 0,0001	1,80 %
TRI 150 m	5,755	23,489	> 0,0001	1,43 %
TRI 210 m	5,660	19,101	> 0,0001	1,17%
VRM 90 m	1,726	14,790	> 0,0001	0,93 %
VRM 150 v	4,206	17,862	> 0,0001	1,09 %
VRM 210 m	3,770	19,343	> 0,0001	1,18 %
Экспозиция	5,036	8,207	> 0,0001	0,53 %
Крутизна	5,822	26,580	> 0,0001	1,61 %

Примечание. edf – установленное число степеней свободы, dev – доля объясненных девиаций

Таким образом, можно выделить следующий ряд из 4-х метрик (по мере уменьшения их роли в формировании продуктивности сообществ), комбинацию которых можно рекомендовать для включения в многофакторные модели продуктивности:

TPI > TRI 90 m > Крутизна > Экспозиция

Выводы

В данном исследовании проанализирована значимость различных морфологических метрик для дистанционной оценки биомассы сообществ, представленной значениями NDVI. Были подготовлены и оценены наборы пространственных данных, отражающие особенности рельефа исследуемой территории. Результаты анализа взаимосвязи между морфологическими переменными и NDVI согласуются с теоретическими ожиданиями. Например, увеличение пересеченности рельефа связано со снижением продуктивности, а локальные депрессии, способствующие накоплению влаги – с увеличением NDVI. Анализ регрессионных моделей показал, что ни одна из морфологических переменных не является сильным предиктором NDVI, например, многомасштабный индекс топографического положения (TPI) обеспечивает наибольшую объясненную вариацию на уровне всего 3,17 %. Тем не менее, индивидуальные эффекты всех переменных были статистически значимы на самых высоких уровнях доверия.

Очевидно, что на продуктивность травяных сообществ влияет множество факторов, каждый из которых вносит свой вклад в сложность экологических систем. Хотя морфологические характеристики рельефа сами по себе не являются сильными предикторами, их статистически значимые эффекты подчеркивают их роль как важных компонентов этой многофакторной структуры. Упуская эти переменные при построении более сложных моделей, мы рискуем допустить систематические ошибки и снизить точность прогнозов. Это подчеркивает важность разработки и применения комплексных многофакторных моделей, учитывающих

сложные взаимодействия между большим количеством маловажных по отдельности факторов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ Донецкий ботанический сад по теме «Классификация почвенно-растительного покрова с помощью методов дистанционного зондирования Земли» (Регистрационный № 124101500495-0).

1. *Bangira T., Mutanga O., Sibanda M., Dube T., Mabhaudhi T. Remote sensing grassland productivity attributes: a systematic review // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, N 8. P. 2043.*
2. *Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. Vol. 8, N 7. P. 1991–2007.*
3. *Gao Q., Schwartz M. W., Zhu W., Wan Y., Qin X., Ma X., Liu S., Williamson M. A., Peters C. B., Li Y. Changes in global grassland productivity during 1982 to 2011 attributable to climatic factors // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, N 5. Art. 384.*
4. *Li S., Li X., Gong J., Dang D., Dou H., Lyu X. Quantitative analysis of natural and anthropogenic factors influencing vegetation NDVI changes in temperate drylands from a spatial stratified heterogeneity perspective: a case study of Inner Mongolia Grasslands, China // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, N 14. Art. 3320.*
5. *Neal J., Hawker L. FABDEM V1-2. 2023. URL: <https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn> (accessed 01.12.2024).*
6. *Riley S.J., De Gloria S.D., Elliot R. A Terrain ruggedness that quantifies topographic heterogeneity // Intermountain Journal of Science. 1999. Vol. 5, N 1–4. P. 23–27.*
7. *Terrain analysis: principles and applications / eds by J.P. Wilson, J.C. Gallan. John Wiley & Sons, 2000. 524 p.*
8. *Wold A.N., Meddens A.J., Lee K.D., Jansen V.S. Quantifying the effects of vegetation producti-*

- vity and drought scenarios on livestock production decisions and income // *Rangelands*. 2023. Vol. 45, N 2. P. 21–32.
9. Wood S.N. Inference and computation with generalized additive models and their extensions // *Test*. 2020. Vol. 29, N 2. P. 307–339.
10. Yu L., Liu Z., Li Y. Evaluation on spatiotemporal consistency between solar-induced chlorophyll fluorescence and vegetation indices in grassland ecosystems // *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19, N 11. P. e0313258.
11. Zhao W., Rong Y., Zhou Y., Zhang Y., Li S., Liu L. The relationship of gross primary productivity with NDVI rather than solar-induced chlorophyll fluorescence is weakened under the stress of drought // *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, N 3. Art. 555.

Поступила в редакцию: 03.12.2024

UDC: 551.43:58.02:528.88

MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF RELIEF AS FACTORS OF NDVI VARIATION IN GRASS COMMUNITIES OF DONBASS

I.I. Strelnikov, Yu.V. Ibatulina, A.A. Marmorshtein, A.V. Klyukina

Federal State Budgetary Scientific Institution «Donetsk botanical garden»

The study analyzed the impact of topographic metrics (TPI, TRI, VRM, slope, aspect) on the productivity of grass communities in Donbass, measured using NDVI. Although all metrics showed statistical significance, their contribution to explaining NDVI variation was low (maximum 3.17 % for TPI). The results confirm the need for multi-factor models to more accurately assess productivity, considering the complex interactions between topographic and other ecological factors.

Key words: NDVI, digital elevation model, topographic morphological analysis

Citation: Strelnikov I.I., Ibatulina Yu.V., Marmorshtein A.A., Klyukina A.V. Morphological characteristics of relief as factors of NDVI variation in grass communities of Donbass // *Industrial Botany*. 2024. Vol. 24, N 4. P. 100–108. DOI: 10.5281/zenodo.14638338
