

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ  
И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ЗАВИСИМОСТЬ УРОВНЯ NDVI ОТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ  
ЛАНДШАФТА И ЕЕ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВО ВРЕМЕНИ НА ПРИМЕРЕ  
ЗАПАДНОЙ ОКОНЕЧНОСТИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА  
(П-ОВ ТАРХАНКУТ)

© 2021 г. С. М. Шадчинов\*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: shadchinov@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

В статье решается задача оценки зависимости функционирования ландшафта от его пространственной структуры. Предмет исследования – связь между фитомассой растительности, выраженной значениями NDVI, и морфометрическими величинами, рассчитанными с цифровой модели рельефа. Чувствительность растительного покрова к характеристикам рельефа для причерноморских степей Тарханкутского полуострова оценивалась средствами мультирегрессионного анализа. Были получены графики динамики нормированного регрессионного коэффициента с 1998 по 2019 гг. Анализ климатических данных выявил, что засушливость года отражается в значениях коэффициентов. В наиболее сухой 2007 г. чувствительность фитомассы к геоморфологическим условиям заметно уменьшилась. Анализ графиков показал, что межсезонная изменчивость чувствительности растительности к рельефу больше, чем межгодовая. Также было выявлено увеличение связи между биомассой растительности и расчлененностью рельефа от начала к концу вегетационного периода.

*Ключевые слова:* степь, ландшафт, пространственная структура, NDVI, динамика фитомассы, множественная регрессия, Тарханкутский полуостров

DOI: 10.31857/S0205961421040059

## ВВЕДЕНИЕ

Функционирование природно-территориальных комплексов происходит под влиянием множества факторов, набор и степень воздействия которых может изменяться при разных масштабах рассмотрения (Хорошев, 2016). Функционирование предполагает осуществление полезной работы системой, а в биологических системах функционирование тесно связано с биологической продукцией (Пузаченко и др., 2002). Функционирование ландшафтов изменяется при воздействии различных факторов и имеет разную динамику на разных временных интервалах рассмотрения. Поэтому показатели межгодовой или межсезонной изменчивости пространственных единиц могут служить индикатором чувствительности к внешним воздействиям (Хорошев, 2019).

Растительность во многом определяет состав и структуру экосистемы (Mo et al., 2019). Растительный покров, его биологическая продуктивность, является одним из наиболее информативных показателей функционирования ландшафта (Базилевич, 1993). В ландшафтах дефицитного увлажнения (степи, саванны, пустыни и т.д.) чувствительность растительности к внешним воздействиям

значительно повышается. Это дает широкий простор для исследования взаимосвязей и динамики растительного покрова, его биологической продуктивности под воздействием различных факторов.

Среди факторов, влияющих на уровень растительного покрова, можно выделить три уровня. Первый климатический (глобальный), вносит самый большой вклад, особенно в ландшафтах дефицитного увлажнения; количество осадков оказывает сильное влияние на ход вегетационного периода. Второй уровень (локальный) заключается в том, что продуктивность может контролироваться локальными условиями внутри самого ландшафта. А третий уровень приводит нас к тому, что продуктивность зависит не только от локальных условий, но и от окружающих ландшафтов (региональные характеристики) (Phillips, 2002; Хорошев, 2016).

Дистанционные исследования с использованием спектральных вегетационных индексов – востребованная в современной науке дисциплина. Многие из них посвящены многолетним трендам динамики растительности в связи с глобальными изменениями климата (Harris et al., 2014; Tong et al., 2017; Тельнова, 2017; Шевырногов и др.,

2012). Также многие работы исследуют проблему прогнозирования урожая сельскохозяйственных полей с помощью вегетационных индексов (Duan et al., 2017; Nagy et al., 2018; Лысенко, 2019; Терехин, 2015). При этом проблема зависимости показателей функционирования от пространственной структуры ландшафта наименее освещена в литературе. В то же время первые начинания в этой области показали, что продуктивность растительности может зависеть от рельефа, внутренней структуры самого ландшафта и его окружения, экспозиционных различий, от соотношения и формы угодий (Hoechstetter et al., 2008; Likens, Vormann, 1995; Хорошев и др., 2019; Хорошев и др., 2018; Новикова, Соколова, 2008).

Цель данной статьи установить зависимость фитомассы растительного покрова (показателя функционирования) от рельефа ландшафта (его пространственной структуры) и их изменчивости во времени для территории западной оконечности Крымского полуострова (Тарханкут). При поиске связи необходимо определить вид связи и силу этой связи. Для достижения цели были поставлены задачи составления тематической ГИС, где у каждого пикселя модели будут присутствовать значения характеристик рельефа и вегетационного индекса за двадцатидвухлетний период наблюдения с 1998 по 2019 гг. После этого стоит задача на основании данной ГИС выявления пространственных связей с помощью статистических методов. Ставится задача не только выявления зависимости между показателем функционирования (фитомассой) и пространственной структурой (рельефом) ландшафта и его окружения, но и установление специфики изменения этой зависимости во времени.

## ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Территорией исследования является Тарханкутский полуостров, который располагается на западной оконечности Крымского полуострова. Большая часть полуострова покрыта степными ландшафтами. Территория сложена известняками неогенового возраста и находится на стыке субтропического и умеренного климата (Автономная республика..., 2003). Особую ценность на полуострове представляет территория природного парка “Тарханкутский”, в пределах которого осуществляется охрана обширных участков нетронутых степей, которые ранее не подвергались распашке.

Природный парк разделяется на два кластера: северный, располагающийся на Джангульском побережье, и южный, затрагивающий степные комплексы вдоль Атлешского побережья. На территории природного парка в летний сезон 2020 г. проводились полевые исследования. Было заложено три ландшафтных профиля (рис. 1): два в

северном кластере и один в южном, для последующей верификации результатов. Всего было сделано 56 описаний.

Ландшафтная структура северного кластера природного парка (рис. 1, а) характеризуется разветвленной системой балок. Балки разного размера протянуты вдоль всего Джангульского побережья с северо-запада на юго-восток, максимальное превышение гребня над тальвегом балки Большой Капель, через которую проходит первый профиль, составляет 28 м. Почвенный покров представлен дерново-карбонатными почвами, как в балках, так и на равнинах между ними.

Растительный покров балок и равнин между ними имеет значительные различия. В днищах балок сильно развит древесно-кустарниковый ярус. Он представлен боярышником (*Crataegus monógya*) высотой до 3 м и шиповником (*Rósa canína*) высотой до 1.5 м, единично встречается айлант высочайший (*Ailánthus altíssima*) высотой до 5 м. На равнинах господствуют разнотравно-типчачково-ковыльные степи. Среди злаков доминируют ковыль-волосатик (*Stípa capilláta*), ковыль Лессинга (*Stípa lessingiana*), типчак (*Festúca valesiáca*), к ним единично примешиваются тимофеевка степная (*Phleum phleoides*) и житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum*). Разнотравье представлено следующими видами с незначительным проективным покрытием: тысячелистник благородный (*Achilléa nóbilis*), лен многолетний (*Línium perénne*), сухоцвет однолетний (*Xeránthemum ánnuum*), зопник крымский (*Phlómis taurica*), молочай степной (*Euphórbia stepposa*). Незначительно встречаются некоторые виды полыни: австрийская (*Artemisia austriaca*) и Лерхе (*Artemisia lercheana*), разрозненно небольшими группками растут дубровник нухинский (*Teucrium nuchense*) и дубровник бело-войлочный (*Teucrium pólium*).

Южный кластер природного парка (рис. 1, б) располагается на Атлешском побережье. В отличие от северного кластера на этом участке рельеф территории значительно выровненный, без балочной сети. Участок представляет волнистую равнину на высоте около 10 м над уровнем моря. Почвенный покров сложен дерново-карбонатными почвами с большей долей каменистости. Видовое разнообразие травостоя значительно ниже, древесно-кустарниковый ярус отсутствует. Преобладают полынно-злаковые степи.

Злаки, которые представлены так же типчаком и ковылями, продолжают доминировать в травянистом ярусе, но их проективное покрытие снижается, особенно на каменистых участках, где увеличивается до 15–20% доля полыней, среди которых преобладают полынь Лерхе и полынь кавказская (*Artemisia caucasica*). Разнотравье также незначительно участвует в фитоценозах, единично встречаются зопник крымский, молочай



**Рис. 1.** Участки исследования в пределах природного парка “Тарханкутский”: *а* – северный кластер, *б* – южный кластер.

степной. Группами встречается дубровник нухинский и тимьян крымский (*Thymus tauricus*).

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными источниками информации при проведении исследования послужили данные дистанционного зондирования земной поверхности. Применение данных дистанционного зондирования обеспечивает возможность исследовать более длительный временной ряд, позволяет лучше охарактеризовать ландшафтную структуру, а также наилучшим образом передает континуальную картину исследуемого пространства в отличие от полевых измерений в конкретных точках. При этом не стоит принижать роль натуральных наблюдений, которые во многом дополняют информацию и позволяют провести полевую верификацию расчетных характеристик, полученных в ходе использования дистанционных данных.

В работе использовались космические многозональные снимки Landsat TM, OLI со спутников Landsat-5 и Landsat-8 пространственным разрешением 30 м за 22-летний период с 1998 по 2019 гг. Отобранные снимки относятся к коллекции Landsat level-2, с заранее проведенными геометрическими и атмосферными коррекциями. Снимки подбирались преимущественно за летнее время, в середине вегетационного периода (июнь–июль). Дополнительно для снимков Landsat-8 были отобраны сцены начала (апрель–май) и конца периода вегетации (вторая половина августа–сентябрь), что обеспечивает ряд наблюдений в течение всего вегетационного периода с 2014 по 2019 гг.

Для характеристики растительного покрова использовались вегетационные индексы. Проводился расчет нормализованного относительного вегетационного индекса (NDVI). Индекс пред-

ставляет собой комбинацию между инфракрасным и видимым красным каналами многозональных снимков и рассчитывается по следующей формуле:  $[NIR - RED]/[NIR + RED]$  (Rouse et al., 1973; Tucker, 1979). Индекс отражает состояние растительности и также хорошо коррелирует с наземной фитомассой растений (Johansen, Tømtervik, 2014; Хорошев, 2020) и с их биологической продуктивностью (Garbulsky et al., 2010; Tian et al., 2016).

Влагообеспеченность в ландшафтах дефицитного увлажнения играет ключевую роль, недостаток влаги является лимитирующим фактором (проявление закона минимума Либиха) (Birtwistle et al., 2016; Georganos et al., 2017, Хорошев и др., 2019). Климатический фактор является определяющим для влагообеспеченности, поэтому дополнительно использовались климатические данные. Были взяты значения сумм осадков по месяцам с ближайшей к территории исследования метеостанции в пгт. Черноморское (по данным сайта [www.pogodaiklimat.ru](http://www.pogodaiklimat.ru)). На этой основе было посчитано суммарное количество осадков за малый вегетационный период с апреля по июль за период с 1998 по 2019 гг., данная характеристика наиболее полно отражает уровень засушливости года, поскольку именно в это время и накапливается основная биомасса растительности (Черемисинов и др., 2015).

Пространственная структура ландшафтов полуострова характеризуется через рельеф и его особенности, для этого была взята цифровая модель рельефа Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) с 90-метровым пространственным разрешением. Для корректного сопоставления значений пикселей модели рельефа со значениями вегетационных индексов и последующего объединения в одну базу данных необходимо было привести их к общему разрешению. Для этого была проведена процедура передискретизации (Resampling) для данных SRTM, после чего разрешение данной модели увеличилось до 30 м, что соотносится с разрешением снимков Landsat.

Всего на основе цифровой модели рельефа средствами Saga GIS было рассчитано 24 показателя, которые включают морфометрические величины, влажностные индексы и потенциальные значения солнечной радиации (Congrad et al., 2015). В табл. 1 приводится полный перечень рельефных характеристик. На основе дистанционных данных был создан ГИС-проект, где у каждого пикселя имеется значение каждого из рассчитанных показателей. В дальнейшем проводился анализ связей между рассчитанными показателями рельефа и растительности средствами статистических методов в программном пакете Statistica. Для начала 24 величины, полученные с цифровой модели рельефа, приведенные выше, для сниже-

ния размерности, были с помощью факторного анализа (метод главных компонент) преобразованы в 7 синтезированных компонентов, то есть наиболее значимых факторов организации пространственной структуры (факторные нагрузки (factor loadings) представлены в таблице ниже).

Выявление самих пространственно-временных зависимостей проводилось методом множественной регрессии, где в качестве зависимой переменной в регрессионном уравнении выступали значения индекса сцены за одно дистанционное наблюдение, а в качестве независимых переменных выступали значения факторов (factor scores). Регрессионный анализ проводился для значений индекса NDVI на каждую дату съемки. При оценке результатов регрессионного анализа основное внимание уделялось нормированному регрессионному коэффициенту Beta, значение которого по модулю определяет силу вклада того или иного фактора (главного компонента) в распределение значений зависимой переменной (индекса, показателя функционирования).

Значения меры чувствительности (регрессионного коэффициента) были сведены в общую таблицу, а затем были визуализированы в виде графиков, где на оси абсцисс отмечены даты наблюдения, а по оси ординат отмечены значения регрессионного коэффициента, что позволяет провести анализ его динамики во времени. Всего было получено три графика, отображающих межгодовую динамику с 1998 по 2019 гг. (для середины вегетационного периода), межсезонную динамику с 2014 по 2019 гг. (по снимкам с Landsat-8), а также в течение всего года, расположив даты съемки в календарном порядке (если отбросить разность увлажнения в разные годы).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе факторного анализа главные компоненты суммарно описывают более 81% всей выборки. Результаты факторного анализа, визуализированные на рис. 2, наглядно демонстрируют, что полученные семь главных компонентов широко описывают основные свойства рельефа в распределении потоков тепла и влаги на территории полуострова. Анализ факторных нагрузок каждой величины в совокупности с визуализацией факторных значений позволяет проинтерпретировать свойства всех семи главных компонентов.

Компонент № 1 отделяет высокие гребни от приморских долин и понижений, его можно условно назвать фактором превышения над уровнем моря. Он вносит самый существенный вклад в описание общей дисперсии данных (около 25%), его собственное значение (eigenvalue) составляет 5.94. Второй по значимости компонент

**Таблица 1.** Состав характеристик рельефа, рассчитанных с цифровой модели рельефа, и их факторные нагрузки в методе главных компонент

Характеристика рельефа	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6	Фактор 7
Абсолютная высота	-0.814739	0.074041	0.255449	-0.444973	-0.078047	-0.197534	0.007176
Экспозиция	-0.001965	0.088339	0.332383	0.177243	0.053267	-0.096663	-0.851336
Уклон	0.748322	0.502824	-0.010523	-0.330577	-0.173621	-0.134718	-0.006028
Затененность	-0.141145	-0.302907	-0.770985	-0.307784	-0.087970	0.120476	0.196275
Площадь водосбора	0.123042	-0.419971	0.191122	0.081224	-0.625682	-0.025976	-0.023005
Уклон водосбора	0.849379	0.261779	0.019245	-0.167741	0.024863	-0.075288	0.071787
Закрытые понижения	0.031311	-0.158269	0.066246	0.037840	-0.119393	0.174467	0.308599
Индекс конвергенции	-0.282729	0.545710	-0.308817	0.235384	0.215686	-0.284826	0.035630
Поперечная крутизна	-0.277423	0.601049	-0.354450	0.380241	-0.098729	-0.287006	0.070346
Продольная крутизна	-0.361763	0.469953	-0.240190	0.299705	-0.487424	-0.026685	-0.052471
Аккумуляция потоков	0.147329	-0.396673	0.209305	0.061805	-0.603321	0.156693	-0.016065
Длина склонов	0.769459	0.309000	0.073987	-0.381469	-0.192903	-0.107788	-0.040304
Модифицированная площадь водосбора	0.134125	-0.508383	0.054560	0.320387	-0.219070	-0.457618	0.092262
Относительное положение склона	-0.618497	0.492240	0.223030	-0.030632	-0.043103	0.381775	0.046093
Глубина вреза	0.770279	-0.307409	-0.214519	0.206421	0.074828	-0.191910	-0.040901
Уровень базиса эрозии	-0.758872	-0.086092	0.228385	-0.481086	-0.039839	-0.328311	0.020298
Превышение над базисом эрозии	-0.271085	0.641619	0.123321	0.117399	-0.157316	0.509766	-0.050632
Saga индекс влажности	-0.503399	-0.622312	0.105603	0.248173	0.101653	-0.273094	0.087470
Топографический индекс влажности	-0.039794	-0.804511	0.238320	0.042926	-0.178240	0.124346	-0.043250
Индекс расчлененности	0.754985	0.494732	-0.002394	-0.328641	-0.178774	-0.127550	0.003020
Индекс рельефной позиции	-0.350398	0.592920	-0.338636	0.382951	-0.365876	-0.197806	0.005013
Суммарная радиация	-0.208446	-0.345993	-0.789806	-0.306277	-0.083960	0.082362	-0.266770
Рассеянная радиация	0.611076	-0.251368	-0.303475	0.584646	0.154105	0.280336	-0.018710
Прямая радиация	-0.223312	-0.340067	-0.782816	-0.320546	-0.087723	0.075621	-0.266435

№ 2 также играет важную роль, описывая почти 20% всех значений, собственное значение равно 4.70. Данный компонент отвечает за расчлененность территории. Компонент № 3 уже имеет собственное значение в 1.6 раза меньше, чем у второго компонента, 2.82. Третий компонент описывает около 12% общей дисперсии и отражает освещенность территории, а точнее затененность, поскольку у данного фактора наименьшие значения приходятся на самые освещенные территории.

Компонент № 4, как и первые два фактора, характеризует общую специфику рельефа полуострова. Он отвечает за выровненность поверхности, то есть отделяет территории с резким перепадом высот от сглаженных равнин. Он описывает 9% от общей дисперсии, и его собственное значение составляет 2.16. Далее идут уже менее значимые факторы, собственные значения которых нахо-

дятся в диапазоне от 1.5 до 1. Эти факторы относятся больше к локальным характеристикам местности. Компоненты № 5 и 6 отвечают за характеристики долин водотоков. Пятый компонент отделяет водотоки с большой площадью водосбора от водотоков с маленькой площадью водосбора (6% вклада), а шестой компонент отделяет долины водотоков по разному превышению локального водораздела над тальвегом (5.5% вклада). И самый низкий вклад (порядка 4%) из всех отобранных компонентов вносит компонент № 7, при этом его собственное значение составляет 1.04, что немногим больше установленного порога в 1.00. Данный компонент отвечает за экспозиционные различия ландшафтов.

Переходя к результатам регрессионного анализа, при помощи которых выявлялись связи, на рис. 3 можно видеть межгодовую измен-

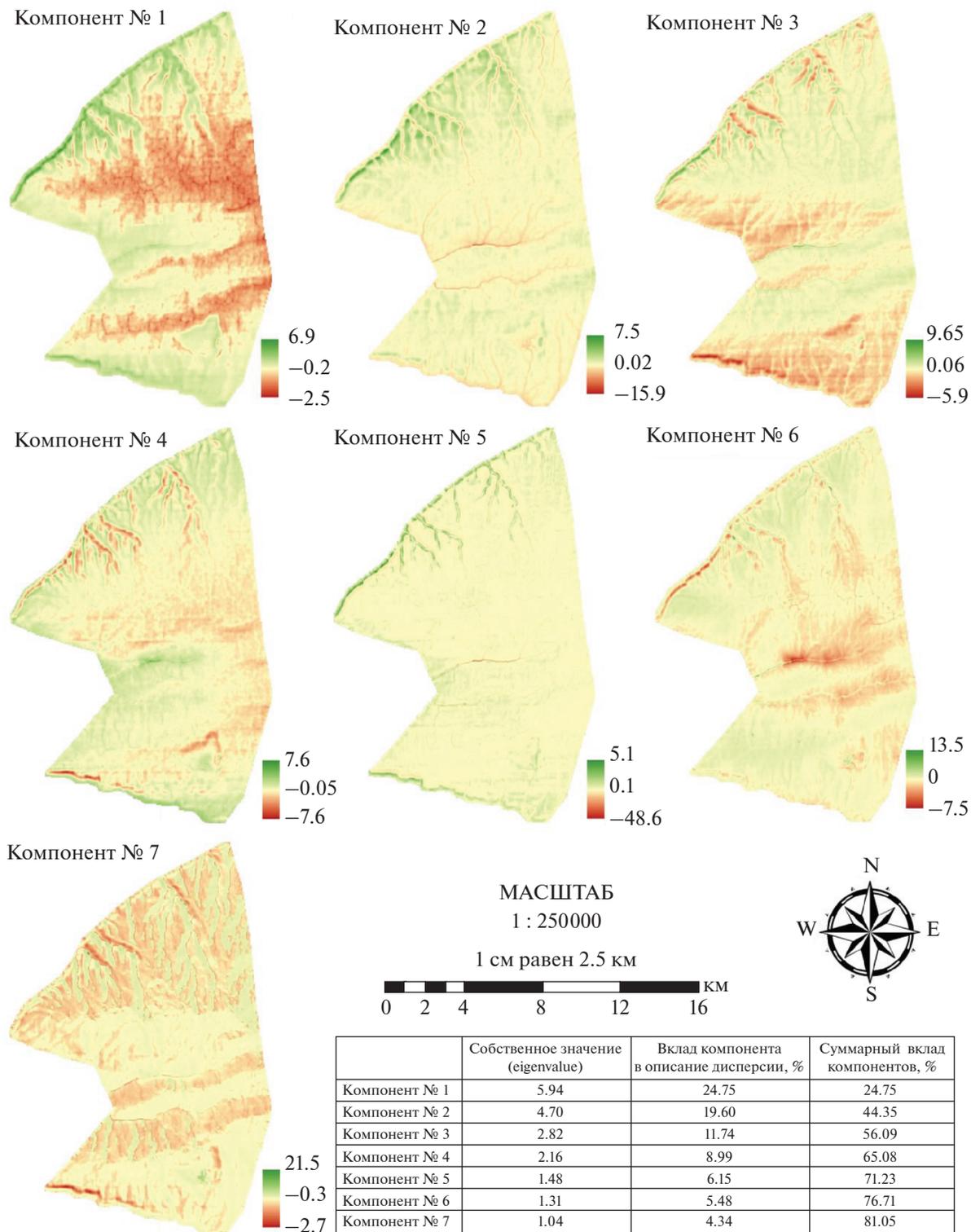
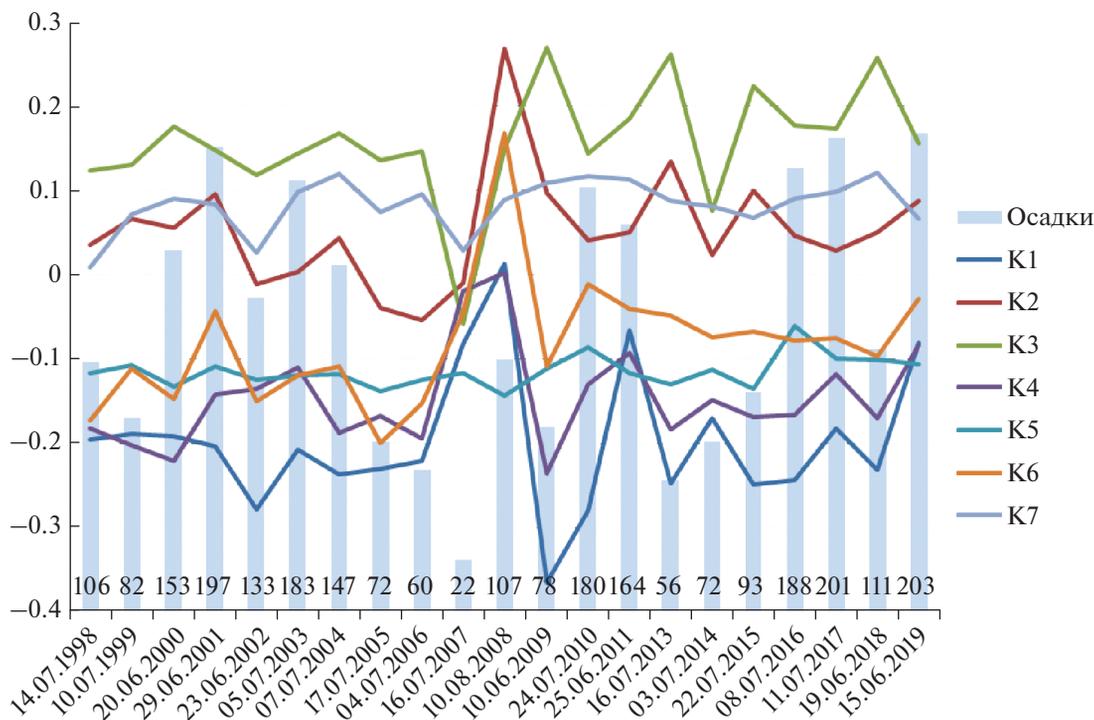


Рис. 2. Визуализация результатов факторного анализа.

чивость зависимости между значениями NDVI и главными компонентами. Из анализа распределения данных по графику можно сделать вывод о том, что до 2007 г. устойчивость связей

была выше, начиная с 2007 г. количество экстремальных выбросов значений коэффициента увеличивается, график становится более скачкообразным.



**Рис. 3.** Межгодовая динамика значений нормированного регрессионного коэффициента в регрессионном уравнении, где независимые переменные – значения факторов организации рельефа, зависимая переменная – значения NDVI за в середине вегетационного периода с 1998 по 2019 гг.

Дополнительные сведения о количестве осадков, выпавших за малый вегетационный период, позволяют сделать вывод о том, что сухость года влияет на силу чувствительности уровня NDVI по отношению к рельефу. Особенно это заметно для 2007 г., который выдался наиболее сухим за весь период наблюдения (22 мм осадков), а среднемесячные температуры на  $3^\circ$  превышали норму (по данным сайта [www.pogodaiklimat.ru](http://www.pogodaiklimat.ru)). То есть растительный покров был в удрученном состоянии во всех комплексах в течение жаркого сухого лета 2007 г., что отразилось на связях, они заметно ослабились, поскольку уровень NDVI был низкий по всему полуострову.

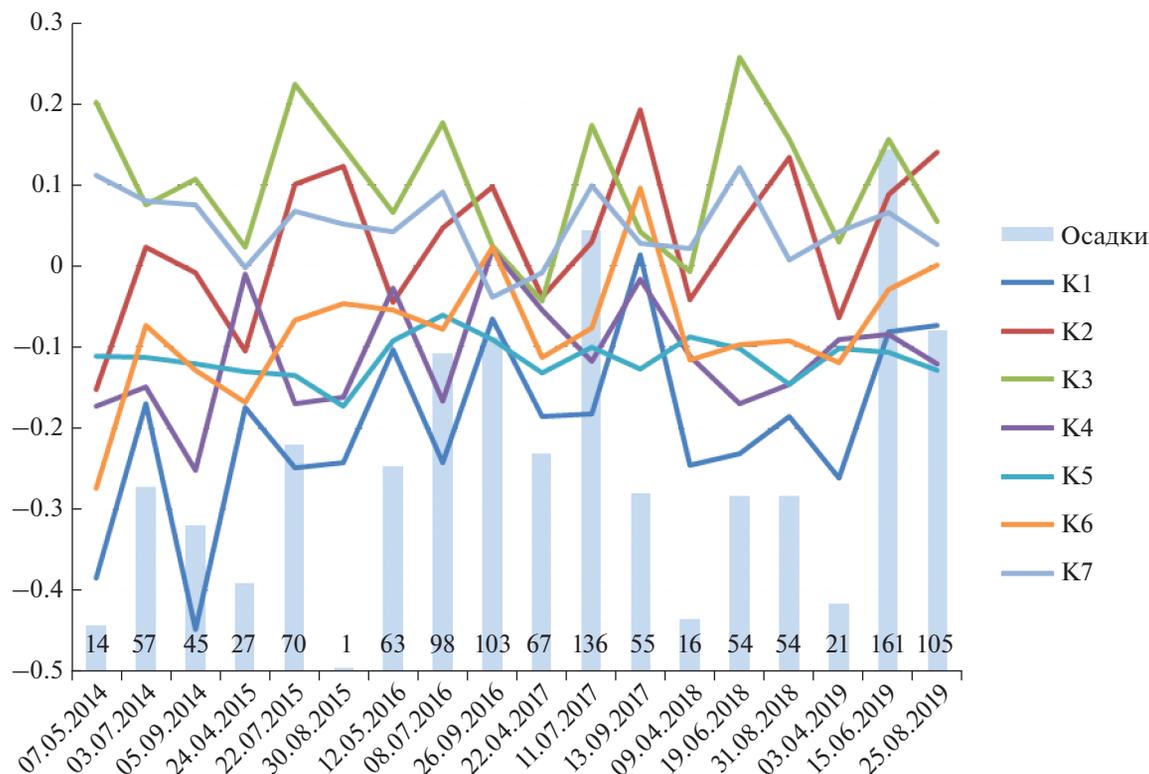
Также климатические данные показывают, что в период после 2007 г. увеличилась контрастность годов между собой: очень сухие года сменяли очень влажные. Например, в июне 2015 г. выпало 22% от месячной нормы осадков, а в июне 2016 – 277%, в июне 2017 – 233%, в июне 2018 – 35%, а в июне 2019 – больше трех норм, 358%. Такая климатическая неустойчивость могла повлиять на устойчивость компонентов, связанных с рельефом, что в принципе отражает рис. 3.

Наиболее устойчивыми во времени являются компоненты № 5 и 7 (факторы размера водосбора и экспозиции), но значения их коэффициентов не очень большие по модулю, что говорит о сла-

бой связи со значениями NDVI. Самую сильную связь за исследуемый период имеют компоненты № 1 и 3 (факторы превышения над уровнем моря и освещенности), но устойчивость этих связей во времени неоднозначна, так как значения регрессионного коэффициента имеют сильную амплитуду колебаний от больших значений по модулю в одни сроки до практически нулевых значений в другие.

Компонент № 4 (фактор выровненности поверхности) по своему воздействию и устойчивости во времени довольно схож с первым компонентом, но имеет более слабую силу связи. У компонентов № 2 и 6 (факторы расчлененности и глубины вреза долины) наблюдается колебание значений во времени, есть экстремальный пик в 2008 г. Но в целом связь второго и шестого компонентов со значениями NDVI не такая сильная, как у других компонентов, у фактора глубины вреза долины фиксируется ослабление связи после 2009 г.

Также стоит дополнить, что данные за 2008 и 2009 гг. наименее объективны, так как даты съемки этих сцен являются самыми крайними среди периода наблюдений (10 августа и 10 июня соответственно). Эти сроки в степной зоне могут относиться к другому периоду вегетации, и значения NDVI в этот срок могут отличаться от значений для середины июля. Для этого было



**Рис. 4.** Межсезонная динамика значений нормированного регрессионного коэффициента в регрессионном уравнении, где независимые переменные – значения факторов организации рельефа, зависимая переменная – значения NDVI в начале, середине и конце периода вегетации с 2014 по 2019 гг.

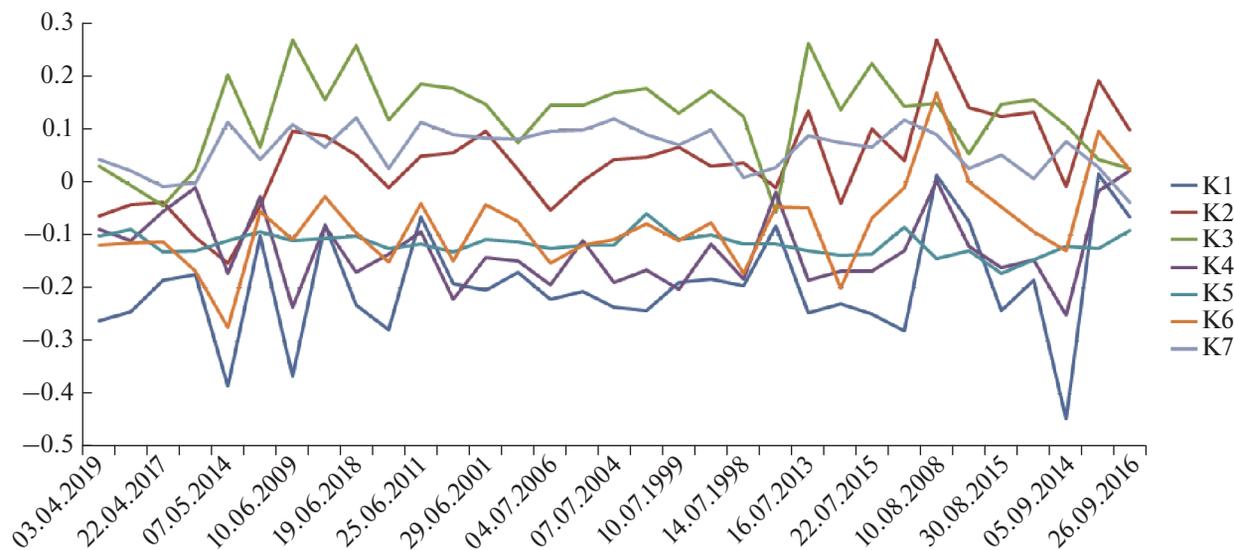
проведено исследование межсезонной динамики, были проведены регрессионные анализы для начала, середины и конца периода вегетации с 2014 по 2019 гг., а их результаты также визуализированы (рис. 4). На рис. 4 для улучшения его восприятия также добавлены данные о количестве осадков. Для начала вегетационного периода дано суммарное количество осадков, которое прошло за календарный месяц перед датой съемки, а для середины и конца то суммарное количество осадков, которое было зафиксировано между датами съемки.

Исходя из графика, можно сделать вывод о том, что межгодовая устойчивость связи NDVI и рассчитанных главных компонентов намного сильнее, чем межсезонная. Значения коэффициента в разные годы сильно разнятся между сезонами. Наиболее устойчивым остается фактор размера водосбора (компонент № 5), как и на графике межгодовой динамики (рис. 3), но сила связи его при этом одна из самых слабых. Самую прочную связь по-прежнему имеет фактор превышения над уровнем моря (компонент № 1), но его устойчивость между сезонами и годами сильно варьируется. В более сухие года межсезонная устойчивость сильнее, чем во влажные, при этом связь в середине лета может как усиливаться (на-

пример, компонент № 3), так и ослабевать (компонент № 5), относительно его начала и конца. Выровненность поверхности (компонент № 4), как и в межгодовой динамике, имеет схожую устойчивость с первым компонентом, но более слабую связь.

Компоненты № 3 и 7, которые связаны с освещенностью и экспозицией, заметно усиливают свое влияние на зеленую фитомассу в середине лета, по сравнению со значениями коэффициента в начале и конце. Опять же регрессионный коэффициент для фактора освещенности имеет более высокие значения по модулю, что говорит о более прочной связи. Для глубины врез долины (компонент № 6) характерны не очень тесные связи с NDVI в течение года, которые к концу вегетационного периода заметно ослабевают по сравнению с началом. При этом анализ климатических данных показывает, что значения регрессионного коэффициента для фактора глубины врез долины стремятся к нулю в зависимости от количества осадков в середине и конце вегетационного периода, с увеличением количества осадков связь ослабевает.

Расчлененность территории (компонент № 2) в течение сезона меняет знак коэффициента, на



**Рис. 5.** Динамика значений нормированного регрессионного коэффициента в регрессионном уравнении, где независимые переменные – значения факторов организации рельефа, зависимая переменная – значения NDVI в течение года.

смену отрицательным значениям в середине лета приходят положительные значения, а к осени связи укрепляются. У данного компонента связь увеличивается по модулю в течение всего вегетационного периода, что также видно из графика, в котором все даты наблюдения выстроены в календарном порядке (рис. 5). Это может быть связано с тем, что в начале периода вегетации значения NDVI высокие во всех ландшафтах исследуемого полигона, а с течением времени в расчлененных сетью балок равнинах значения NDVI остаются на том уровне, когда фоновые значения NDVI для плоских территории наоборот уменьшаются.

Данный факт свидетельствует о влиянии структуры на показатели функционирования ландшафта, что подтвердилось полевыми наблюдениями. Цветовой аспект степи был более зеленый в более расчлененном участке природного парка рядом с Джангульским побережьем, чем на более плоском участке Атлешского побережья, в одинаковые дни наблюдения. Так же были отмечены различия в фенологических фазах растений на двух участках. Например, лен многолетний (*Linum perenne*) в пределах более расчлененного участка еще цвел, в то время как на более плоском участке цветение уже закончилось, и созрели корзинки с семенами.

Если опустить разность в увлажнении за разные годы и отсортировать все обработанные данные по дате от самой ранней к самой поздней (то есть в календарном порядке), то получится график динамики зависимости между главными компонентами и NDVI в течение года (рис. 5). Из

графика следует, что в апреле у коэффициентов наименьшие по модулю значения, в это время связь ниже. В мае их значения резко увеличиваются, а устойчивость, наоборот, уменьшается. Затем в период с последней недели июня по середине июля наблюдаются наиболее устойчивые значения, но при этом связи ослабевают, по сравнению с маем и началом июня. Во второй половине лета и начале осени устойчивость вновь снижается, а изменчивость коэффициента увеличивается в разные годы. При этом многие связи к сентябрю упрочняются (значения коэффициента увеличивается по модулю).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По данным космических снимков Landsat и цифровой модели рельефа SRTM получена ГИС на территорию Тарханкутского полуострова, у которой для каждого пикселя имеются значения морфометрических характеристик рельефа, преобразованных в главные компоненты, а также значения индекса NDVI для каждого срока наблюдения с 1998 по 2019 гг.

2. С помощью регрессионного анализа были получены графики изменчивости во времени меры чувствительности растительного покрова от пространственной структуры полуострова.

3. Анализ климатических данных показал, что засушливость года также влияет на чувствительность растительного покрова от пространственной структуры. В частности, во время засухи 2007 г. вся растительность находилась в угнетенном состоянии, от чего связи между растительностью и релье-

фом ослабились. Поэтому в дальнейших исследованиях необходимо постараться нивелировать эффект климатического фактора на растительность.

4. Межгодовая изменчивость чувствительности растительности к рельефу намного устойчивее, чем межсезонная изменчивость. Динамика регрессионного коэффициента в разные сезоны разных лет может менять свой характер, что может быть связано с климатическим фактором, от которого в дальнейшем анализе необходимо отдалиться. Было установлено, что расчлененность рельефа увеличивает свою связь с уровнем растительного покрова в течение всего вегетационного периода. На более расчлененных участках наблюдается удлинение вегетационного периода и увеличение накопления фитомассы. Данный факт был подтвержден полевыми исследованиями.

5. Для степей Тарханкутского полуострова характерен сезонный ход вида зависимости между рельефом и фитомассой. В апреле связи ослаблены из-за общего высокого уровня зеленой фитомассы. В мае значения коэффициента резко увеличиваются, а устойчивость тесноты связи снижается. С последней недели июня по середину июля связи ослабевают, но увеличивается их устойчивость. Во второй половине лета и начале сентября устойчивость снижается, но значения коэффициентов увеличиваются и связи упрочняются.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00464).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Автономная республика Крым: Атлас / Н.В. Багров и др. Киев; Симферополь, 2003. 80 с.
- Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Новикова Л.А., Соколова М.С. Структура и динамика растительности Кунчеровской степи // Изв. ПГПУ им. В.Г. Белинского. Естественные науки. 2008. № 10(14). С. 13–25.
- Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н., Алещенко Г.М. Разнообразии ландшафта и методы его измерения // География и мониторинг биоразнообразия. М.: Экоцентр МГУ, 2002. С. 76–177.
- Тельнова Н.О. Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агроэкосистем лесостепной и степной зон северной Евразии // Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 97–107.
- Терехин Э.А. Оценка сезонных значений вегетационного индекса (NDVI) для детектирования и анализа состояния посевов сельскохозяйственных культур // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 23–31.
- Хорошев А.В. Зависимость изменчивости параметров функционирования от пространственной структуры ландшафта как основание для планировочных решений // География и современные проблемы географического образования. Материалы конференции. Екатеринбург, 2019. С. 42–49.
- Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.
- Хорошев А.В. Пространственная структура как фактор стабильности биопродукционного функционирования степных геосистем (на примере Айтуарской степи, Южный Урал) // Принципы экологии. 2020. Т. 9. № 3. С. 71–86.
- Хорошев А.В., Леонова Г.М., Шарова Д.Е. Пространственная устойчивость межкомпонентных связей в степных и лесостепных ландшафтах Южного Урала // Вопросы степеведения. 2019. № 15. С. 337–341.
- Хорошев А.В., Ткач К.А., Муртазина Д.У. Влияние ландшафтных условий на урожайность зерновых культур в степной зоне Северного Казахстана // Вестник Московского Университета. Сер. 5. География. 2018. № 3. С. 62–69.
- Черемисинов А.А., Жердев В.Н., Черемисинов А.Ю., Радцевич Г.А. Климатические и водные ресурсы, формирующие сельскохозяйственный потенциал Центрального Черноземья: Серия – Природообустройство: монография. Воронеж: ВГАУ, 2015. 313 с.
- Шевырногов П.А., Чернецкий М.Ю., Высоцкая Г.С. Многолетние тренды NDVI и температуры на юге Красноярского края // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 6. С. 77–87.
- Birtwistle A.M., Laituri M., Bledsoe B., Friedman J.M. Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes. // J. Arid Environments. 2016. V. 131. P. 15–24.
- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System of Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v.2.1.4. // Geoscientific Model Development. 2015. V. 8. P. 1991–2007.
- Duan T., Chapman S.C., Guo Y., Zheng B. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle // Field Crops Research. 2017. V. 210. P. 71–80.
- Garbulsky M.F., Peñuelas J., Papale D., Ardö J., Goulden M.L., Kiely G., Richardson A.D., Rotenberg E., Veenendaal E.M., Fillela I. Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems // Global Ecology and Biogeography. 2010. V. 19. P. 253–267.
- Georganos S., Abdi A.M., Tenenbaum D.E., Kalogirou S. Examining the NDVI-rainfall relationship in the semi-arid Sahel using geographically weighted regression // J. Arid Environments. 2017. V. 146. P. 64–74.
- Harris A., Carr A.S., Dash J. Remote sensing of vegetation cover dynamics resilience across southern Africa // International J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 28. P. 131–139.
- Hoehstetter S., Waltz U., Dang L.H., Thinh N.X. Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – A proposal to modify the existing set of landscape metrics // Landscape Online. 2008. V. 3. P. 1–14.

*Johansen B., Tømmervik H.* The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 27. P. A. P. 20–30.

*Likens G.E., Bormann F.H.* Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. 2nd ed. N.Y.: Springer-Verlag, 1995. 160 p.

*Mo K., Chen Q., Chen C., Zhang J., Wang L., Bao Z.* Spatio-temporal variation of correlation between vegetation cover and precipitation in an arid mountain-oasis river basin in northwest China // *J. Hydrology*. 2019. V. 574. P. 138–147.

*Nagy A., Fehér J., Tamás T.* Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics // *Computers and Electronics in Agriculture*.

*Phillips J.D.* Global and local factors in earth surface systems // *Ecological Modelling*. 2002. V. 149. P. 257–272.

*Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *Proceedings of the Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I*. 1973. P. 309–317.

*Tian F., Brandt M., Liu Y.Y., Verger A., Tagesson T., Diouf A.A., Rasmussen K., Mbow C., Wang Y., Fensholt R.* Remote sensing of vegetation dynamics in drylands: Evaluating vegetation optical depth (VOD) using AVHRR NDVI and in situ green biomass data over West African Sahel // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 177. P. 265–276.

*Tong X., Brandt M., Hiernaux P., Herrmann S.M., Tian F., Prishchepov A.V., Fensholt R.* Revisiting the coupling between NDVI trends and cropland changes in the Sahel drylands: A case study in western Niger // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 191. P. 286–296.

*Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. V. 8(2). P. 127–150.

## Relationships between Temporal Variability of NDVI and Landscape Spatial Pattern on the Western Edge of Crimean Peninsula (Tarkhankut Peninsula)

S. M. Shadchinov

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Dependence between functioning parameters and landscape spatial pattern is characterized by the relationships between NDVI-level and morphometric values from topography model for the steppes of Tarkhankut peninsula. Graphs of vegetation dynamics and its sensitivity to relief were built based on statistical methods from 1998 to 2019. Analysis of climate data showed that the dryness affects the vegetation sensitivity. For example 2007 was the driest year in this study and relations was the lowest during the observation period. Generally seasonal variability of vegetation sensitivity to topography is more than interannual. Also relations between vegetation biomass and terrain ruggedness increased during the growing season.

*Keywords:* steppe, landscape pattern, landscape spatial pattern, NDVI, vegetation dynamics, Tarkhankut peninsula

### REFERENCES

Avtonomnaya respublika Krym: Atlas / N.V. Bagrov et al. Kyiv; Simferopol, 2003. 80 p. (In Russian).

*Bazilevich N.I.* Biologicheskaya produktivnost' ekosistem severnoy Evrazii. Moscow: Nauka, 1993. 293 p. (In Russian).

*Birtwistle A.M., Laituri M., Bledsoe B., Friedman J.M.* Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes // *J. Arid Environments*. 2016. V. 131. P. 15–24.

*Cheremisinov A.A., Zherdev V.N., Cheremisinov A.Y., Radtsevich G.A.* Klimaticheskie i vodnye, formiruyushchie selskokhozyaystvennyy potentsial Tsentralnogo Chernozem'ya: Seriya – Prirodobustroistvo: monografiya. Voronezh: VGPU, 2015. 313 p. (In Russian).

*Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J.* System of Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v.2.1.4. // *Geoscientific Model Development*. 2015. V. 8. P. 1991–2007.

*Duan T., Chapman S.C., Guo Y., Zheng B.* Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle // *Field Crops Research*. 2017. V. 210. P. 71–80.

*Garbulsky M.F., Peñuelas J., Papale D., Ardö J., Goulden M.L., Kiely G., Richardson A.D., Rotenberg E., Veenendaal E.M., Fillela I.* Patterns and controls of the variability of radiation use efficiency and primary productivity across terrestrial ecosystems // *Global Ecology and Biogeography*. 2010. V. 19. P. 253–267.

*Georganos S., Abdi A.M., Tenenbaum D.E., Kalogirou S.* Examining the NDVI-rainfall relationship in the semi-arid Sahel using geographically weighted regression // *J. Arid Environments*. 2017. V. 146. P. 64–74.

*Harris A., Carr A.S., Dash J.* Remote sensing of vegetation cover dynamics resilience across southern Africa // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 28. P. 131–139.

*Hoehstetter S., Waltz U., Dang L.H., Thinh N.X.* Effects of topography and surface roughness in analyses of landscape structure – A proposal to modify the existing set of landscape metrics // *Landscape Online*. 2008. V. 3. P. 1–14.

*Johansen B., Tømmervik H.* The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2014. V. 27. P. A. P. 20–30.

- Khoroshev A.V.* Relationships between temporal variability of functioning parameters and landscape spatial pattern as a rationale for planning decisions // *Geographia i sovremennye problemy geographicheskogo obrazovaniya. Materialy konferentsii.* Yekaterinburg, 2019. P. 42–49 (In Russian).
- Khoroshev A.V.* Multiple organization of geographical landscape. Moscow: KMK Scientific Press, 2016. 416 p. (In Russian).
- Khoroshev A.V.* Spatial structure as a factor of stability of bioproduction functioning of steppe geosystems (on the example of Aituar steppe, the Southern Urals) // *Principy èkologii.* 2020. V. 9. № 3. P. 71–86 (In Russian).
- Khoroshev A.V., Leonova G.M., Sharova D.E.* Spatial stability of intercomponent relationships in forest and forest-steppe landscapes of the Southern Urals // *Voprosy steppevedeniya.* 2019. № 15. P. 337–341 (In Russian).
- Khoroshev A.V., Tkach K.A., Murtazina D.U.* Influence of landscape pattern on productivity of grain crops in the steppe zone of Northern Kazakhstan // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5. Geographiya.* 2018. № 3. P. 62–69 (In Russian).
- Likens G.E., Bormann F.H.* Biogeochemistry of a Forested Ecosystem. 2nd ed. N.Y.: Springer-Verlag, 1995. 160 p.
- Lysenko S.A.* Crop yield forecasting based on the satellite monitoring of carbon dynamics in terrestrial ecosystems // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* 2019. V. 4. P. 48–59.
- Mo K., Chen Q., Chen C., Zhang J., Wang L., Bao Z.* Spatio-temporal variation of correlation between vegetation cover and precipitation in an arid mountain-oasis river basin in northwest China // *J. Hydrology.* 2019. V. 574. P. 138–147.
- Nagy A., Fehér J., Tamás T.* Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics // *Computers and Electronics in Agriculture.*
- Novikova L.A., Sokolova M.S.* Structure and dynamics of vegetation of Kuncherskoj steppe // *Izv. Penz. gos. pedagog. univ. im. V.G. Belinskogo. Natural sciences.* 2008. № 10(14). P. 13–25 (In Russian).
- Phillips J.D.* Global and local factors in earth surface systems // *Ecological Modelling.* 2002. V. 149. P. 257–272.
- Puzachenko Y.G., Dyakonov K.N., Aleshchenko G.M.* Raznoobrazie landshafta i metody ego izmereniya // *Geographiya i monitoring bioraznoobrazia.* Moscow: Ecocentr MSU, 2002. P. 76–177 (In Russian).
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *Proceedings of the Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I.* 1973. P. 309–317.
- Shevyrnogov A.P., Chernetskiy M. Yu., Vysotskaya G.S.* Interannual trend of NDVI and temperature in the South of Krasnoyarsky Krai // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* 2012. V. 6. P. 77–87.
- Telnova N.O.* Revealing and mapping long-term NDVI trends for the analysis of climate change contribution to agroecosystems' productivity dynamics in the Northern Eurasian forest-steppe and steppe // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2017. V. 14. № 6. P. 97–107 (In Russian).
- Terekhin E.A.* Estimation of seasonal NDVI values for the detection and analysis of crop conditions // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa.* 2015. V. 1. P. 23–31.
- Tian F., Brandt M., Liu Y.Y., Verger A., Tagesson T., Diouf A.A., Rasmussen K., Mbow C., Wang Y., Fensholt R.* Remote sensing of vegetation dynamics in drylands: Evaluating vegetation optical depth (VOD) using AVHRR NDVI and in situ green biomass data over West African Sahel // *Remote Sensing of Environment.* 2016. V. 177. P. 265–276.
- Tong X., Brandt M., Hiernaux P., Herrmann S.M., Tian F., Prishchepov A.V., Fensholt R.* Revisiting the coupling between NDVI trends and cropland changes in the Sahel drylands: A case study in western Niger // *Remote Sensing of Environment.* 2017. V. 191. P. 286–296.
- Tucker C.J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. // *Remote Sensing of Environment.* 1979. V. 8(2). P. 127–150.