

ЛАНДШАФТНАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 911.2(470.56)

ДИНАМИКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ФИТОМАССЫ В ЗАПОВЕДНОМ СТЕПНОМ ЛАНДШАФТЕ (НА ПРИМЕРЕ БУРТИНСКОЙ СТЕПИ, ЗАПОВЕДНИК “ОРЕНБУРГСКИЙ”)

© 2023 г. А. В. Хорошев*, А. П. Ашихмин*, @

* Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

@E-mail: avkh1970@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.09.2023 г.

После доработки 11.10.2023 г.

Принята к публикации 12.10.2023 г.

По результатам применения метода “анализа горячих пятен” по материалам 51 космоснимка Landsat на примере участка “Буртинская степь” заповедника “Оренбургский” описана динамика ареалов положительных аномалий фитомассы относительно окрестности радиусом 300 м. Цель исследования — установить зависимость изменчивости ареалов повышенной фитомассы от ландшафтной структуры и гидротермических условий. Установлено, что переключение фитоценозов переходных зон от степного к луговому типу функционирования обеспечивается варьированием соотношения ксерофитов и мезофитов в зависимости от колебаний гидротермических условий. Повторяемость и площадь положительных аномалий фитомассы в днищах ложин коррелирует с их площадью на частично залесенных склонах, что указывает на позитивную роль лесной растительности в устойчивости притока влаги в днища. В обезлесенных водосборах солнечных склонов площадь положительных аномалий фитомассы определяется запасом снеговой влаги, а в водосборах северных склонов — осадками теплого периода. Решающее значение для наиболее устойчивых положительных аномалий фитомассы имеют показатели конвергенции влаги и вогнутость рельефа, а не площадь водосбора.

Ключевые слова: степь, NDVI, анализ горячих пятен, ареал, динамика, рельеф, гидротермические условия

DOI: 10.31857/S1026347023600796, **EDN:** GTSIWB

Трудоемкость определения фитомассы долгое время сдерживало исследование ее пространственной организации. Временные ряды были получены на серии модельных площадок в разных ландшафтных зонах, что позволило создать фундаментальные сводки как о балансе фитомассы, так и о ее географических различиях (Базилевич, 1993; Титлянова и др., 2018). Однако лишь с ростом доступности материалов космической съемки и с разработкой вегетационных индексов, прежде всего — нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) как индикатора зеленой фитомассы, в последние два десятилетия появилась возможность оценивать тренды биопродуктивности и получить континуальную картину пространственного варьирования зеленой фитомассы в глобальном, региональном и локальном масштабах.

Традиционно основным направлением применения NDVI является исследование многолетней динамики продуктивности разных зон в связи с климатическими трендами (Михайлов и др.,

2010; Спивак и др., 2017; Гусев, 2020). Помимо интерпретации NDVI как индикатора собственно зеленой фитомассы с некоторыми поправками на сезонный и погодный аспекты его информативности и экранирующую роль мортмасс (Lyle *et al.*, 2013; Nagy *et al.*, 2018; Хорошев и др., 2023), растет интерес к информативности его сезонного хода и временной изменчивости. Например, установлена информативность сезонного хода NDVI для идентификации и классификации разных типов растительности (Senay, Elliott, 2000; Адамович и др., 2017; Терехин, 2017). Количественные показатели амплитуды изменчивости NDVI привлекались в качестве критерия секвестрационного потенциала экосистем (Мячина и др., 2022). Установлена зависимость фитопродукционного процесса от снегоудерживающей роли разных типов фитоценозов (Шинкаренко, 2015).

В то же время отмечено, что при оценках фитомассы (особенно на сельскохозяйственных угодьях) посредством вегетационных индексов редко учитываются ландшафтные особенности тер-

ритории (почвенный покров, морфометрические характеристики), которые существенно влияют на особенности развития растений (Рулев и др., 2015). Среди ландшафтных и геоботанических факторов вариабельности сезонной динамики NDVI наиболее подробно исследовались экспозиция склона (Шинкаренко и др., 2019; Донгак и др., 2022) и проективное покрытие (Терехин, 2019). Показана индикативная роль NDVI для прогнозирования цифрового картографирования химических и физических свойств почв, различающаяся в зависимости от условий рельефа (Гопп и др., 2017; Савин и др., 2015).

Динамика ареалов с различными запасами фитомассы исключительно важна для распознавания резких и постепенных, стабильных и пульсирующих границ ландшафтных комплексов (Хорошев, 2022). В ландшафтоведении традиционно при проведении границ между природными комплексами приоритет отдавался структурным признакам, которые часто фиксируются по единовременным полевым наблюдениям, т.е. по одному “кадру” из длинного «фильма» о жизни геосистемы (Сочава, 1978), что может приводить к ошибочным решениям. Добавление функционально-динамических признаков, в частности — о динамике различий фитомассы между смежными территориями, позволит более строго и аргументированно различать ядра типичности, экотоны, зоны пластичного функционирования (с переключением между режимами соседних комплексов).

Динамика ареалов повышенных или пониженных значений фитомассы и устойчивость к сезонным гидротермическим колебаниям обычно оценивается путем визуального анализа полей NDVI во временном ряду снимков (Колотухин и др., 2018); однако более достоверные результаты могут быть получены с помощью геостатистических методов. Одним из таковых является метод “анализа горячих (холодных) пятен” (Hot (Cold) Spots Analysis), который позволяет на основании статистики Гетиса-Орда выявлять достоверные скопления значений, отличающихся от некоторой определенной исследователем окрестности.

Метод Hot Spots Analysis довольно популярен в социально-географических и медико-географических исследованиях. Например, показана его эффективность для исследований кластеризованности заболеваемости и медицинских учреждений (Siljander *et al.*, 2022; Kuznetsov *et al.*, 2020; Архипова, Черногубова, 2019; Vallarta-Robledo *et al.*, 2021), демографических показателей (Khan *et al.*, 2017; Добрякова, Добряков, 2021), преступности (Liu *et al.*, 2023; Nemeth *et al.*, 2014). В геологии метод применяется при изучении кластеризации очагов землетрясений (Chandra *et al.*, 2023; Бондаренко, Любимова, 2020). В ландшафтных и экологических исследованиях метод пока применя-

ется редко. В частности, он апробирован в исследованиях скоплений морских млекопитающих (Девликамов, Тепляшина, 2022), гидрохимической обстановки (Добрякова и др., 2020). Метод применялся для исследований пространственно-временной организации фитопродукционного процесса в результате изменений водообеспеченности после сооружений дамб в области муссонного климата (Nallan *et al.*, 2015), динамики зеленых зон как фактора формирования городских островов тепла (Ranagalage *et al.*, 2018), для оценок неопределенности результатов моделирования потоков углерода по структуре землепользования (Li *et al.*, 2016). Была продемонстрирована результативность анализа горячих пятен для определения скорости восстановления степного режима фитопродукционного функционирования после прекращения распашки (Khoroshev, 2021) и для индикации ландшафтных экотонов с переменным режимом функционирования (Хорошев, 2022).

Положительные аномалии (“горячие пятна”) зеленой фитомассы (ПАФ) характеризуют положение, размеры и конфигурацию растительных сообществ, структура и функционирование которых в данный момент отличается от окружения повышенной фитомассы благодаря некоторым постоянным или временным локальным ландшафтными факторам. Хорошо известно, что в фитоценозе часто есть виды-пациенты, которые могут становиться доминантами или просто развивать большую фитомассу в отдельные благоприятные периоды (Работнов, 1992). Отсутствие (или исчезновение по сравнению с предшествующим периодом) “горячего пятна” — это необязательно индикатор малой фитомассы; это может означать примерно одинаковую фитомассу (большую или малую) в смежных сообществах. Например, мезофитное сообщество в днище лощины степной зоны может поздней весной и в начале лета не отличаться по фитомассе от соседних ксерофитных сообществ на склонах в силу достаточного почвенного увлажнения после снеготаяния. После пожара также на некоторое время может происходить выравнивание значений фитомассы между экологически контрастными геотопами; положительной аномалии нет. Важно, что статистика Гетиса-Орда, используемая для выделения “горячих” и “холодных” пятен, распознает не единичные “выдающиеся” точки, а их кластеры, т.е. близкое соседство высоких значений. Это позволяет рассматривать положительные аномалии фитомассы не как “точечное” биотическое явление (например, случайное пятно высокопродуктивной нитрофильной растительности после кратковременного нарушения), а как следствие некоторого фактора “географического” масштаба (фациального, урочищного и др.), который проявляется благодаря определенному сочетанию

нию геолого-геоморфологических и гидрологических условий.

В заповедной степи в качестве такого сильного локального фактора в летний период чаще всего выступает избыточное или достаточное почвенное увлажнение, а в весенний — раннее (по сравнению со смежными фитоценозами) прогревание почвы. При небольших площадях водосбора поверхностный сток возникает лишь в весенний период на короткий срок; в остальное время фитомасса контролируется почвенной влагой.

В статье проверяется гипотеза, что характеристики ареалов положительных аномалий фитомассы в степной зоне индицируют наличие или отсутствие (в зависимости от гидротермических условий) внутрпочвенных потоков влаги, т.е. латеральной связи между урочищами склонов и днища. Цель исследования — установить зависимость изменчивости ареалов повышенной фитомассы от ландшафтной структуры и гидротермических условий. Последовательно решались задачи: выявить зависимость повторяемости положительных аномалий фитомассы от видового состава фитоценоза; установить их ландшафтную приуроченность; выявить зависимость сезонного хода площади аномалий фитомассы от ландшафтных и гидротермических условий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на участке государственного заповедника “Оренбургский” “Буртинская степь” (рис. 1). На территории преобладает моноклиналиное залегание пластов осадочных пород. Современный денудационный холмисто-увалистый рельеф района начал формироваться в донеогеновое время на месте аккумулятивной равнины (Чибилёв, 1996). Абсолютные отметки на участке колеблются от 420.9 м (плато Муелды) до 230 м (отметка тальвега балки Белоглинка). Буртинская степь лежит в континентальном секторе подзоны типичных степей на междуречье левых притоков Урала рек Урта-Буртя и Бурля в ландшафте предгорной глубокорасчленённой структурно-эрозионной возвышенной равнины, сложенной пермо-триасовыми осадочными породами моласовой формации, в сочетании с карстовыми котловинами на месте соляно-гипсовой структуры, выполненными юрскими озерными суглинками, с типичными разнотравно-типчаково-залесско-ковыльными степями на южных черноземах (Еремеева, 2010; Хорошев и др., 2013). Заповедный режим существует с конца 1980-х гг. В растительном покрове наиболее распространены залесскоковыльные степи, часто встречаются сообщества овсцово-вой, степномятликовой, типчаковой, мохнато-грудницевой и ковылковой формаций; нередки степи с кустарниками, кустарниковые степи и заросли кустарников, с участием *Amygdalus nana*,

Cerasus fruticosa, *Chamaecytisus ruthenicus*, *Caragana frutex*, *Spiraea crenata*, *Spiraea hypericifolia*; по берегам ручьев и в местах близкого залегания грунтовых вод формируются луга и черноольшанники; по балкам встречаются осинового и березово-осиновые колки (Калмыкова, 2012).

Для получения информации о динамике пространственного варьирования зеленой фитомассы составлен временной ряд космических снимков с радиометрической коррекцией: всего 51 космоснимок Landsat 5 и Landsat 8 с разрешением 30 м за период с 2010 по 2020 годы с апреля по октябрь. Для каждого срока рассчитаны значения NDVI для 50418 пикселей, охватывающих 4538 га. Для даты в период полевых наблюдений (21.06.2022) рассчитан также влажностный индекс NDWI. Средствами ГИС ArcMap 3.0 растровое изображение NDVI для каждого срока переведено в векторный точечный формат. Для выявления и анализа областей с повышенной или пониженной (относительно некоторой фоновой окрестности) фитомассой в ГИС ArcMap 3.0 был применен метод анализа горячих пятен. По статистике Getis-Ord Gi для 51 срока для каждого пикселя была оценена достоверность возникновения положительных аномалий фитомассы (“горячих пятен”, ПАФ) относительно окрестности с радиусом 300 м при настройке Inverse Distance Squared, которая позволяет уменьшить вклад более дальних пикселей в расчет. По результатам расчета в программе Statistica 7.0 построены карты вероятностей (т.е. повторяемости в долях 1) возникновения горячих или холодных пятен при уровне значимости $p = 0.10$ и менее.

Для каждого срока была рассчитана доля положительных аномалий фитомассы (ПАФ) от площадей днища ложины и склонов 20 малых водосборов, из которых 5 расположены на южном склоне массива Южный Кармен, а 15 — на северном и западном склонах массива Муелды. Рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена (K_{sp}) в пределах каждого бассейна между долями положительных аномалий фитомассы в урочищах днищ и склонов, выделенных согласно ландшафтной карте А.П. Еремеевой (Хорошев и др., 2013). Рассчитаны описательные статистики повторяемости ПАФ для каждого типа фитоценоза и каждого вида урочищ.

Полевая верификация расчетов по дистанционным материалам включала комплексные описания заранее намеченных площадок. Выбирались смежные пиксели с различными вероятностями возникновения ПАФ. Выполнялось комплексное описание рельефа (генезис мезоформы, микроформы, уклон, экспозиция), почв (мощности, цвет гранулометрический состав горизонтов) и фитоценоза (видовой состав, обилие видов, проективное покрытие и высота ярусов), собирались укосы надземной рас-



Рис. 1. Положение в системе физико-географического районирования (красный квадрат) (а) и космический снимок (б) участка “Буртинская степь” государственного заповедника “Оренбургский” в Беляевском районе Оренбургской области. Источники: (а) — Национальный атлас России, (б) — портал Google Earth Pro.

тительной биомассы с площадки 50×50 см, затем определялись сырая и сухая зеленая фитомасса и масса подстилки. Кроме того, проведены комплексные описания видового состава фитоценозов, почв и рельефа на 359 площадках, представляющих все виды фитоценозов и варианты форм рельефа Буртинской степи. Названия растений определялись по работе (Рябинина, Князев, 2009).

Путем построения линейных графиков в программе Statistica 7.0 установлен типичный годовой ход NDVI и площади аномалий фитомассы для типов фитоценозов. По цифровой модели рельефа с разрешением 30 м рассчитаны непараметрические коэффициенты корреляции Спирмена между повторяемостью ПАФ в пикселях и морфометрическими свойствами рельефа, рассчитанными в ГИС SAGA GIS 7.4 (топографические позиционные индексы TPI и индексы расчлененности TRI для окрестностей с радиусом 90, 150, 210, 270, 330, 390, 450 м, индексы конвергенции, площадь водосбора, топографический индекс влажности, уклон, вертикальная и плановая кривизны, относительная позиция на склоне, превышение над тальвегом).

По данным метеостанции Беляевка рассчитаны гидротермические показатели холодного сезона и теплого периода до даты съемки: среднемесячные температуры и осадки, сумма осадков холодного и теплого периодов, гидротермический коэффициент Селянинова (отношение удесятеренной суммы осадков к сумме активных температур за период. Зависимость повторяемости ПАФ от гид-

ротермических показателей оценивалась по коэффициентам корреляции Спирмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимость повторяемости положительных аномалий фитомассы от видового состава фитоценоза

Полевые наблюдения, проведенные в июне 2022 г., пришлось на месяц с пониженными относительно среднесезонных значений температур (18.9°C при среднем 20.2°C) и осадками (11 мм при среднем 32 мм). Предшествующий месяц также был более холодным, но значительно более влажным, по сравнению со среднесезонными значениями. Значения NDVI в пределах Буртинской степи варьировали в интервале 0.05–0.53, что отражает широкий диапазон условий почвенного увлажнения в зависимости от рельефа, освещенности, расположения зон разгрузки грунтовых вод (табл. 1). NDVI и влажностный индекс NDWI содержат практически идентичную информацию (коэффициент корреляции Спирмена 0.95) при несколько меньшей тесноте связи в диапазоне NDVI менее 0.3 ($K_{sp} = 0.85$) и очень высокой при NDVI более 0.3 ($K_{sp} = 0.97$).

Полевая верификация и ландшафтно-геоботаническая интерпретация разной повторяемости положительных и отрицательных аномалий фитомассы проведена в переходной зоне между луговыми и степными урочищами в приустьевой части балки “Белоглинка”, расположенной в пределах низменной денудационно-аккумулятивной

Таблица 1. Средние значения и стандартное отклонение значений NDVI в видах сообществ Буртинской степи 21 июня 2022 г.

Вид сообщества	Средний NDVI	Стандартное отклонение NDVI
Степи петрофитные южных склонов инееватопырейно-залесскоковыльно-типчаковые со спиреей и эфедрой	0.25	0.04
Степи ксерофитные австрийскополынно-грудницево-типчаково-залесскоковыльные пологоувалистых равнин	0.23	0.03
Степи мезоксерофитные плато и пологих подгорных шлейфов ковылково-полынно-типчаково-залесскоковыльные	0.24	0.03
Степи мезоксерофитные северных склонов ядовитоястребинково-типчаково-залесскоковыльные со спиреей и раkitником	0.26	0.03
Степи мезоксерофитные водосборных понижений и лощин мятликово-таволгово-типчаково-ковыльные со спиреей и раkitником	0.29	0.03
Степи мезоксерофитные водосборных понижений и слабоврезанных ложбин понтийскополынно-кострецово-типчаково-залесскоковыльно со спиреей и раkitником	0.33	0.04
Луга днищ лощин марьянниково-девясилово-таволгово-кострецовые закустаренные, местами с порослью осины	0.35	0.04
Луга днищ лощин ползучепырейно-понтийскополынно-солонечниково-вейниково-кострецовые	0.39	0.05
Колки днищ и нижних частей склонов глубоко врезанных лощин березово-осиновые таволгово-кострецово-вейниковые	0.44	0.05

равнины с фоновыми значениями зеленой фитомассы 43–48 ц/га. Коэффициент корреляции между значениями NDVI и измеренной зеленой фитомассой в июне 2022 г. составил 0,58. Коэффициент корреляции Спирмена между сухой и влажной фитомассой составляет 0.78. В пределах пологоувалистой равнины в ксерофитных степях при сходных зеленых фитомассах NDVI существенно ниже (0.22–0.26), чем в мезоксерофитных степях приустьевой части балки Белоглинка (0.30–0.36), что обусловлено более низким проективным покрытием – 50–65% против 70–90%). Проективное покрытие вносит более существенный вклад в формирование NDVI, чем высота травостоя и видовое богатство. При одинаковых фитомассах завышению NDVI способствует повышенное обилие *Artemisia armeniaca*, *A. pontica*, *Agropyron repens*, *Galatella rossica*, *Sanguisorba officinalis*, *Fragaria viridis*, а занижению NDVI – повышенное обилие *Festuca valesiaca* и *Koeleria gracilis*. Предыдущими исследованиями в типичностепных сообществах было установлено, что в зависимости от месяца ведущий вклад в NDVI вносит фитомасса либо злаков, либо разнотравья, но показатель отражает не только зеленую фитомассу, но и ее соотношение с массой ветоши и подстилки (Хорошев и др., 2023).

Выявлены следующие особенности сезонного хода аномалий фитомассы.

В тростниковом сыролуговом сообществе “холодное пятно” пониженной фитомассы стабильно держится в течение мая и только в самом конце мая превращается в ПАФ (повторяемость в долях единицы – 0.57), которое сохраняется в течение всего лета и осени в годы с любой влажностью, включая экстремально сухой 2010 г. ПАФ на фоне смежных ксерофитных и мезоксерофитных сообществ сохраняется, несмотря на резкое падение NDVI от августа к октябрю (от 0.8 до 0.2).

Для кострецового (с *Agropyron repens*, *Sanguisorba officinalis*) лугового сообщества в годовом ходе NDVI характерен пик значений в конце мая и начале июня с медленным спадом к концу лета (рис. 2, т. 639). Ярко выраженное сильное межгодовое варьирование в течение всего теплого периода отражает колебание условий увлажнения от луговых до степных и соответствующее регулярное появление и исчезновение положительных аномалий. ПАФ на фоне окружающих степных сообществ (повторяемость 0.45) формируется во второй декаде мая и существует в течение лета и осени, изредка исчезая (например, в жарком сухом августе 2014 г.). В экстремально жарком 2010 г., несмотря на летнее сокращение фитомассы, площадка принадлежала “луговой” аномалии.

В хвощово-кострецово-ковыльном лугоостепном сообществе переходной зоны холодное пятно, связанное с замедленным снеготаянием и прогреванием почвы, исчезает в третьей декаде мая. Летом

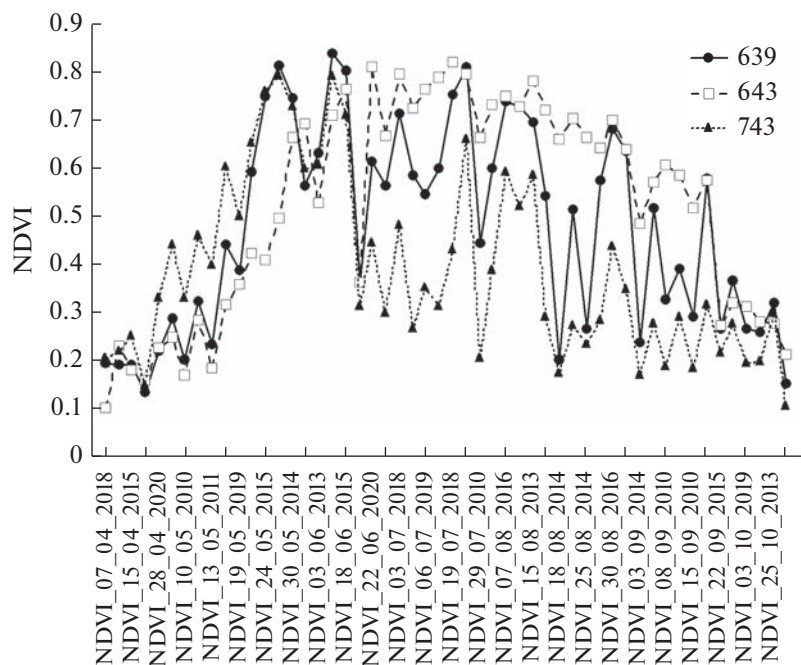


Рис. 2. Годовой ход вегетационного индекса NDVI для сообществ с разной повторяемостью положительных аномалий фитомассы: кострцового лугового (точка описания 639), кострцово-типчаково-ковыльного (т. 643), тонконогово-типчаково-ковыльного (т. 743). Подписаны каждое второе измерение NDVI (из массива 51 снимка Landsat) в порядке возрастания номера суток от начала года.

наличие ПАФ (повторяемость 0.11) определяется гидротермическими условиями года: существует во влажном 2015 и 2016 (когда возрастает доля мезофитов), исчезает в сухом 2019 (когда возрастает доля ксерофитов). Однако в экстремально жаркий сухой 2010 г. продолжала существовать ПАФ как следствие близкого соседства с переувлажненной ложкой.

В кострцово-типчаково-ковыльном мезоксерофитном степном сообществе, в отличие от кострцового, пик вегетации смещается на вторую половину июня с последующим более медленным спадом при меньшем диапазоне межгодового варьирования (рис. 2, т. 643). ПАФ (повторяемость 0.06) может возникать в апреле и мае за счет эфемероидов. Летом в большинстве случаев не отличается от степного фона.

В тонконогово-типчаково-ковыльном разреженном ксерофитностепном сообществе наиболее хорошо выражен типично степной ход NDVI с пиком в начале июня и резким последующим спадом (рис. 2, т. 743). ПАФ может возникать в самом начале апреля, но в мае-июле и сентябрю-октябре устойчиво «холодное пятно» пониженной фитомассы. В конце августа фитомасса может не отличаться от фоновой.

Сопоставление данных о видовом составе фитоценозов 359 площадок и повторяемости ПАФ в соответствующих пикселях показало, что пластич-

ный режим функционирования с повторяемостью положительных аномалий зеленой фитомассы 0.4–0.6 (т.е. с чередованием степного и лугового режима) характерен для фитоценозов с повышенным обилием следующих видов (необязательно встречающихся совместно): *Spiraea crenata*, *Artemisia armeniaca*, *Artemisia pontica*, *Bromopsis inermis*, *Dianthus andrzejkowskianus*, *Elytrigia repens*, *Festuca valesiaca*, *Filipendula vulgaris*, *Galium boreale*, *Hieracium virosum*, *Poa transbaikalica*, *Sanguisorba officinalis*, *Seseli libanotis*, *Serratula gmelinii*, *Stipa zalesskii*, *Xanthoselinum alsaticum*.

Распространение и ландшафтная приуроченность положительных аномалий фитомассы

Особенностью территории является значительная удаленность двух групп сообществ с постоянно повышенным увлажнением, контрастных по отношению к степному фону: березово-осиновых колков в глубоковрезанных ложках низкогогорного массива Муелды и вейниково-кострцовых и тростниковых лугов в приустьевой части балки Белоглинка. Это хорошо видно по расположению положительных аномалий зеленой фитомассы в летний период (рис. 36). Положительные аномалии фитомассы в летний период ожидаемо наблюдаются в днищах ложин и водосборных понижениях, реже — на пологих склонах (рис. 36). Согласно непараметрическим коэффи-

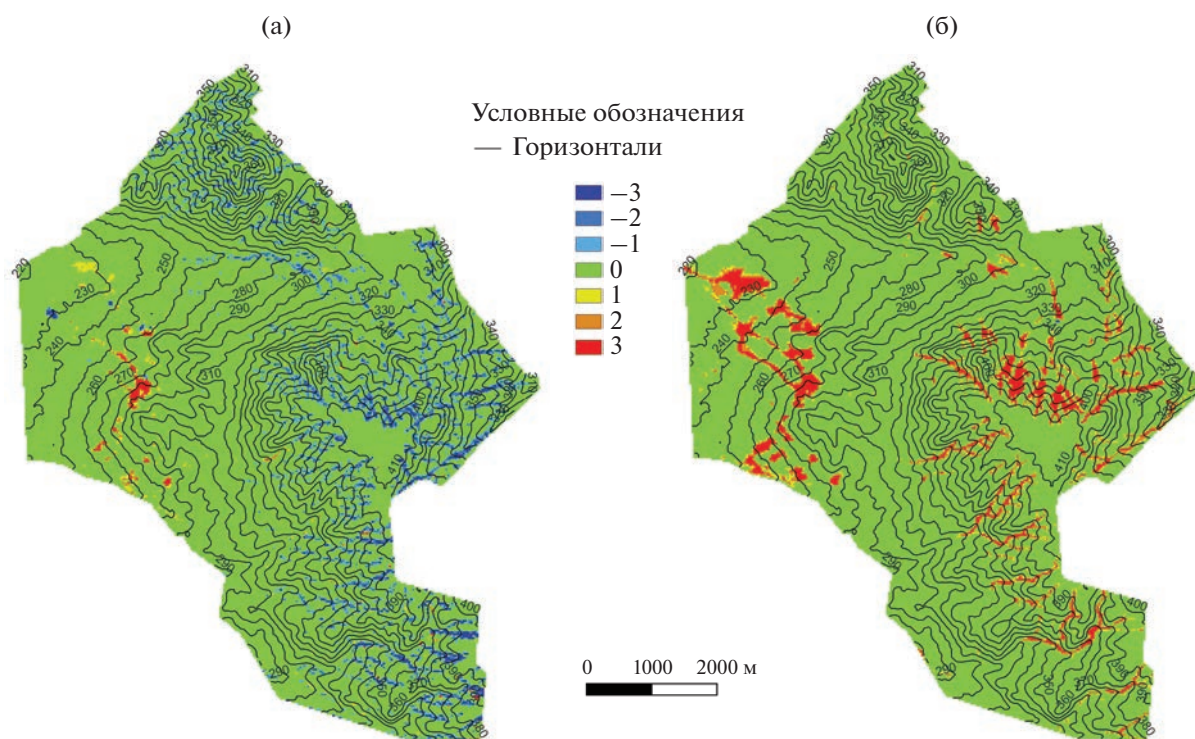


Рис. 3. Пространственное распределение положительных (“горячие пятна”) и отрицательных (“холодные пятна”) аномалий зеленой фитомассы 15 апреля 2015 г. (а) и 19 июля 2015 г. (б). Индексы “1”, “2”, “3” — уровни значимости 0,10, 0,05 и 0,01 соответственно, для положительных аномалий; индексы “–1”, “–2”, “–3” — то же для отрицательных аномалий; “0” — отсутствие аномалий.

циентам корреляции Спирмена повторяемость ПАФ определяется индексом конвергенции (K_{sp} до -0.42), который коррелирует с топографическим позиционным индексом ТРІ. Во всех бассейнах определяющее значение имеет рельеф в окрестности 210–270 м (K_{sp} до -0.46), что примерно соответствует расстоянию от тальвега до локального водораздела с соседним бассейном. При этом не обнаружена ожидаемая зависимость от площади водосбора и топографического индекса влажности.

Наиболее устойчивые положительные аномалии свойственны тростниковым и осоковым лугам, а также черноольшанникам и березово-осиновым колкам. На склонах и выровненных поверхностях вероятность заметно ниже, а на гребнях вероятность приближается к 0. Характерной чертой ландшафта являются разрывы в полосе положительных аномалий фитомассы в лощинах, что означает непостоянство латеральных связей между верхними и нижними их течениями. Бассейны южного склона массива Кармен отличаются гораздо более слабой зависимостью повторяемости ПАФ от рельефа, по сравнению с северным склоном массива Муелды.

Отрицательные аномалии фитомассы наиболее характерны для разреженных разнотравно-

типчакowo-залеcскоковыльных степей низменной слабopасчлененной денудационно-аккумулятивной равнины.

Зависимость сезонного хода площади ареалов положительных аномалий фитомассы от ландшафтных и гидротермических условий

Площади положительных и отрицательных аномалий зеленой фитомассы варьируют в течение года. В апреле (рис. 3а) после обычной по температурам малоснежной зимы положительные аномалии наблюдаются в основном на субгоризонтальных и выпуклых формах рельефа, где снег уже сошел, почва быстро прогрелась, и началась вегетация. Перепад высот почти в 200 м проявляется в более раннем начале вегетации в низменных позициях, где формируются первые положительные аномалии, в основном за счет эфемероидов (*Pulsatilla patens*, *Adonis vologensis*, *Fritillaria ruthenica*, *Gagea minima*, *Tulipa biebersteiniana*). В вогнутых позициях, в частности в глубокооврезанных лощинах массивов Муелды и Южный Кармен, в это время еще лежит снег или полностью отсутствует зеленая фитомасса, что соответствует отрицательным аномалиям (рис. 3а). В летний период по мере иссушения возвышенных позиций, закономерность меняется. В увлажняемых грунтовыми водами и

частично затененных лощинах или в местах разгрузки грунтовых вод с лесными, кустарниковыми, луговыми или луговостепными фитоценозами формируются ПАФ, а в выпуклых позициях с типичными или петрофитными степями — отрицательные аномалии (в некоторые засушливые годы) или, в обычные по увлажнению и температурам годы, фитомасса в пределах фонового диапазона, (рис. 36).

В августе, когда вклад злаков в фитомассу уменьшается, контрасты между более влагообеспеченными лощинами и более иссушенными пригребневыми позициями увеличиваются, что объясняет рост площади ПАФ. В ксерофитных сообществах выпуклых позиций рельефа в это время увеличивается фитомасса грудницы шерстистой (*Galatella villosa*) и полыней (*Artemisia marschalliana*, *Artemisia austriaca* и т.д.), т.е. видов с меньшей яркостью листьев (с сизоватым оттенком).

Наиболее стабильными участками с ПАФ являются урочища с березово-осиновыми колками в вогнутых позициях рельефа и в нижней части склонов. Однако площадь этих ПАФ может летом увеличиваться, что может быть интерпретировано как рост фитомассы смежных мезоксерофитных степей на склонах. С другой стороны, этот эффект может быть связан и с уменьшением фитомассы в сообществах верхних выпуклых частей склонов. В любом случае сообщества склонов, смежные с колками, функционируют в такие периоды иначе, чем степные сообщества выше по склону, т.е. отклоняются от обычного степного режима.

Ареалы ПАФ в лощинах могут во влажные периоды “расползаться” от днищ на склоны. Фитоценозы нижних и средних частей склонов увеличивают свою фитомассу и становятся по зеленой фитомассе больше похожими на луг, чем на степь. В водосборе 103 (рис. 4) площадь ПАФ довольно велика за счет березово-осиновых колков. Однако в некоторые годы это правило нарушается, в частности весной. Весной 2010 и 2011 гг. ареалы ПАФ возникали на степных гребнях при одновременно большой фитомассе в днище лощины. Весной 2015 года ПАФ на гребнях отсутствовали. Анализ гидротермических параметров показал, что ПАФ в выпуклых приводораздельных позициях возникают в годы с низким количеством осадков холодного периода (малоснежная зима), что способствует быстрому прогреву почв и ранней вегетации по сравнению с вогнутыми и затененными позициями. При влажной весне (2015 г.) и после многоснежной зимы (2020 г.) фитомасса формировалась относительно равномерно на гребнях и склонах, и ПАФ на гребнях не возникали, а существовали только в притальвеговых позициях. К концу мая (24.05.2015) зеленая фитомасса степей

уже примерно одинакова на гребнях и склонах, поэтому ПАФ отсутствует.

Водосборы склонов противлежащих массивов Кармен и Муелды неодинаково чувствительны к гидротермическим параметрам. Длина полосы ПАФ в водосборах №№ 11 и 15 (южный склон массива Кармен) достоверно коррелирует с количеством осадков холодного периода, а в водосборах северного склона Муелды №№ 8, 9 и 12 — от суммы осадков теплого периода. ГТК Селянинова не имеет достоверных связей с длиной полосы ПАФ.

Отличительной особенностью водосборов южного склона массива Кармен (№№ 11, 17), в отличие от северного склона Муелды, является отсутствие достоверной корреляции между площадью ПАФ на склонах и в днище: наблюдались изменения в площадях и конфигурации ПАФ в днище при практически отсутствующих изменениях в водосборе. В то же время водосборы с сильной положительной достоверной корреляцией ($K_{sp} > 0.75$) площадей ПАФ на склонах и в днище сосредоточены на северном и западном склонах склона массива Муелды. Они выделяются наибольшей долей (около 12%) лесных колков с мезофитными сообществами. В водосборах с недостоверной связью доля колков не превышает 7%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наличие положительных аномалий фитомассы объясняется двумя группами причин. Во-первых, на фоне степных сообществ площадь и конфигурация положительных аномалий и длительность их существования в теплый период указывают на отсутствие дефицита почвенного увлажнения вследствие притока грунтовых вод. С этим связано сохранение или наращивание фитомассы мезофитными или ксеромезофитными сообществами в типичный для степей период летнего перерыва вегетации. Во-вторых, положительные аномалии могут индизировать асинхронность начала вегетации в зависимости от снежности зимы и температуры весны: на выпуклых водоразделах и южных склонах из-за раннего таяния снега развивается значительная фитомасса эфемероидов, в то время как в днищах лощин и на теневых склонах долго лежит и тает снег. Задержке вегетации способствует и кустарниковый покров в вогнутых позициях рельефа, который задерживает снег, сдуваемый метелевым переносом с возвышенных поверхностей и способствует формированию устойчивого запаса влаги в почвах.

По повторяемости положительных и отрицательных аномалий фитомассы на фоне типичных степей можно идентифицировать сообщества, которые обладают устойчивостью-пластичностью, т.е. способностью переходить из одного устойчивого состояния структуры и функционирования в

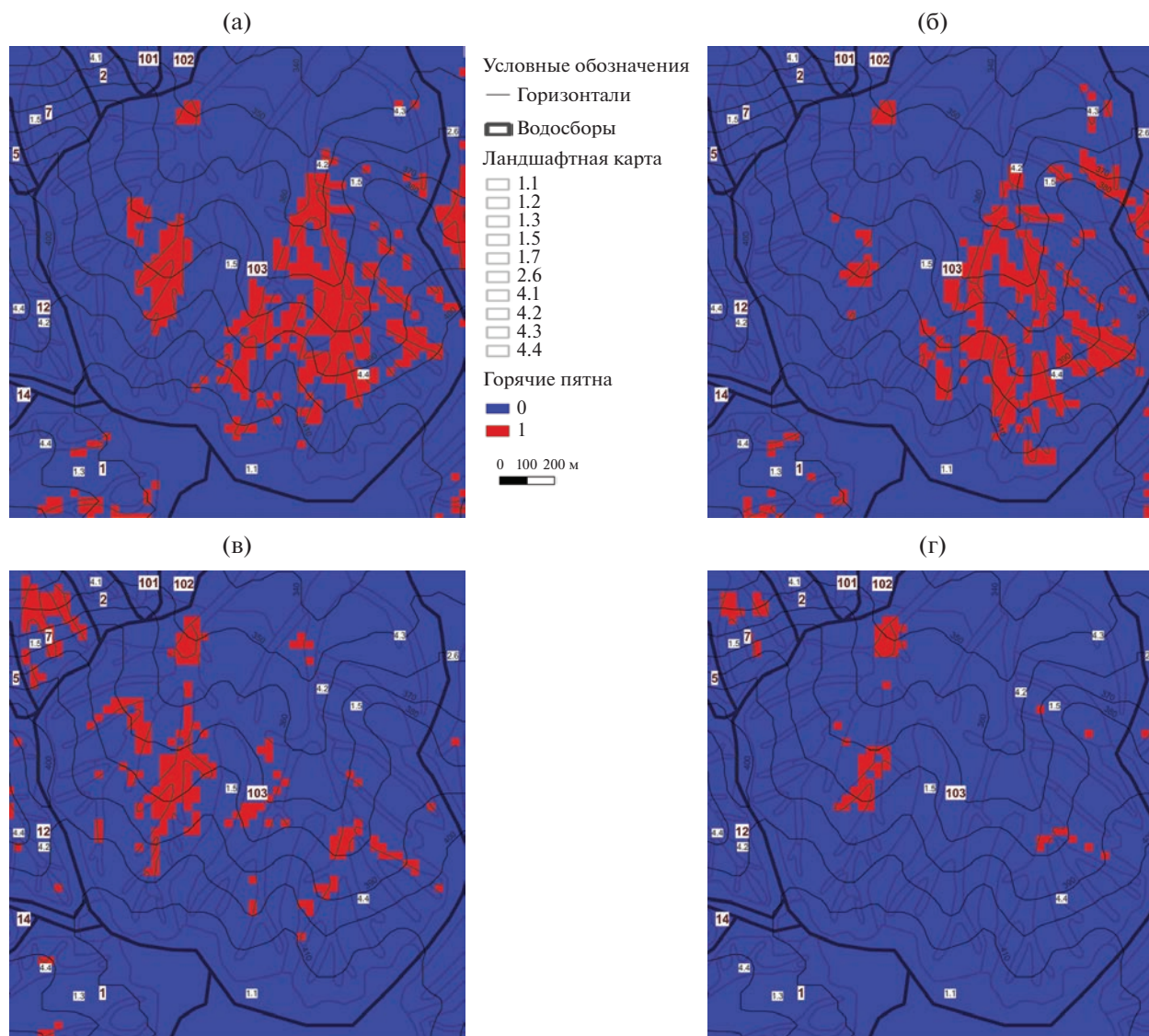


Рис. 4. Межгодовая динамика положительных аномалий фитомассы в водосборе. Даты съемки: а – 10.05.2010, б – 13.05.2011, в – 24.05.2015, г – 05.05.2020. 0 – территории с фоновой фитомассой, 1 – положительные аномалии фитомассы (“горячие пятна”). Черными линиями показаны границы водосборов. Номера урочищ даны по Хорошеву и др. (2013): 1.1 – плоская поверхность плато, сложенная элювиальными суглинками под разнотравно-типчаково-ковыльковыми степями на черноземах южных очень маломощных суглинистых сильнокаменистых; 1.2 – плоские и слабонаклонные поверхности гребней, сложенных элювиальными и делювиальными суглинками под разнотравно-типчаково-залесскоковыльковыми степями на черноземах южных очень маломощных суглинистых сильнокаменистых; 1.3 – узкие гребни, склоны и водосборы ложбин, сложенные суглинистым с щебнем и галькой элювием и делювием под разнотравно-типчаково-залесскоковыльковыми степями на черноземах южных маломощных сильнокаменистых; 1.5 – гребни, склоны и водосборы ложбин, сложенные суглинистым элювием под разнотравно-типчаково-степномятликовыми залесскоковыльковыми степями на маломощных южных черноземах каменистых; 1.7 – узкие гребни, склоны и водосборы ложбин, сложенные суглинистым с щебнем и галькой элювием и делювием под ковыльковыми, степномятликовыми и овсцовыми степями на черноземах южных очень маломощных суглинистых сильнокаменистых; 2.6 – увалисто-волнистая наклонная равнина с разнотравно-типчаково-залесскоковыльковыми и разнотравно-степномятликовыми степями на очень маломощных черноземах южных суглинистых каменистых; 4.1 – неглубокие ложбины, выполненные суглинистым делювием, под разнотравно-типчаково-ковыльными с вейником закустаренными степями на маломощных и среднемощных черноземах южных суглинистых; 4.2 – ложбины, выполненные суглинистым делювием, под разнотравными, злаково-разнотравными и злаково-залесскоковыльными и разнотравно-степномятликовыми степями на среднемощных черноземах южных суглинистых; 4.3 – ложбины, выполненные суглинистым делювием и аллювием, под кустарниками с березовым и осиновым подростом на лугово-черноземных суглинистых почвах; 4.4 – балки, выполненные суглинистым делювием и ложковым аллювием под березово-осиновыми байрачными колками на лугово-черноземных суглинистых почвах.

другое (Гродзинский, 2014): они могут “переключаться” со степного типа функционирования (с потерей фитомассы и летним перерывом в вегетации) на луговой (с наращиванием или сохранением фитомассы) в более влажные периоды.

Статистический анализ связей между повторяемостью положительных аномалий фитомассы и морфометрическими характеристиками рельефа показал, что лесные и кустарниковые сообщества с устойчивыми положительными аномалиями относительно степного фона формируются не там, где собирается много влаги с водосбора, а там, где существует наиболее вогнутый глубоковрезанный сектор долины. По всей видимости, основное значение имеет возможность накопления снега и медленное его таяние и испарение летней влаги ввиду затененности. Слабые корреляции повторяемости положительных аномалий с площадью водосбора и топографическим индексом влажности свидетельствуют об отсутствии накопительного механизма для влагообеспеченности почв к нижней части бассейна. Причинами могут служить: фильтрация в водопроницаемые наклонные пласты, перехват влаги лесными сообществами среднего течения и нижних частей склонов, усиленное испарение с пологих незатененных поверхностей при выходе за пределы возвышенных массивов.

Существенное различие в тесноте связи между повторяемостью ПАФ и рельефом следует связывать с более сильным испарением с южных склонов массива Кармен, по сравнению с северным склоном массива Муелды. Кроме того, исследование показало возможность перетекания влаги между бассейнами по наклонным пластам. Об этом свидетельствуют слабые корреляции между площадями ПАФ на склонах и в днище водосборных бассейнов. Более сильное летнее испарение в водосборах южного склона массива Кармен практически исключает сток влаги со склонов, и поэтому летние осадки никак не влияют на длину сплошной полосы ПАФ в днища ложин. В то же время зимние осадки становятся единственным фактором изменчивости полосы ПАФ. На северном склоне массива Муелды с частичной залесенностью водосборов, наоборот, летние осадки более активно участвуют в подземном стоке и поэтому определяют интенсивность разгрузки в днищах и, соответственно длину полосы ПАФ. При уменьшении доли лесных сообществ уменьшается подземный сток и ослабевает латеральная связь между склонами и днищами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Метод “анализа горячих (холодных) пятен”, опирающийся на статистику Гетиса-Орда, позволяет эффективно выявлять сезонную и межгодовую динамику площади, конфигурации и дли-

тельности существования аномалий фитомассы, индицирующих локальные отклонения режима фитопродукционного функционирования от фоновых условий.

2. Переключение фитоценозов переходных зон со степного на луговой тип функционирования, что соответствует повторяемости положительных аномалий 40–60% от количества сроков, обеспечивается варьированием соотношения ксерофитов и мезофитов в зависимости от колебаний гидротермических условий.

3. Повторяемость возникновения и площадь положительных аномалий фитомассы в днищах ложин и частично залесенных водосборах теневых склонов коррелирует с площадью таковых на склонах, что указывает на позитивную роль лесной растительности в формировании латерально-го внутрисочвенного притока влаги в днища.

4. В обезлесенных водосборах южных склонов площадь положительных аномалий фитомассы определяется в основном запасом снеговой влаги, а в водосборах северных склонов — осадками теплого периода.

5. Решающее значение для формирования лесных и кустарниковых сообществ, формирующих наиболее устойчивые положительные аномалии фитомассы, имеют показатели конвергенции влаги и вогнутость рельефа, а не площадь водосбора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках Госзадания географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова № 121051300176-1 “Факторы и процессы пространственно-временной организации природных и антропогенных ландшафтов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адамович Т.А., Кантор Г.Я., Ашихмина Т.Я., Савиных В.П. Анализ сезонной и многолетней динамики вегетационного индекса NDVI на территории государственного природного заповедника “Нургуш” // Теоретическая и прикладная экология 2018. № 1. С. 18–24.
- Архипова О.Е., Черногузова Е.А. “Горячие точки” заболеваемости злокачественными новообразованиями в Ростовской области: пространственно-временной анализ // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2019. Т. 1. № 4. С. 207–211
- Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
- Бондаренко Н.А., Любимова Т.В. Линеamentный анализ пространственного поля сейсмичности Северо-Западного Кавказа // Региональные географические исследования: Сборник научных трудов. Т. 13. Краснодар: Кубанский государственный университет, 2020. С. 31–38.

- Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Индикационные возможности NDVI в прогнозно картографировании свойств пахотного горизонта почв склоновых позиций на юге Западной Сибири // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1377–1389.
- Гродзинский М.Д. Ландшафтная экология. К.: Знання, 2014. 550 с.
- Гусев А.П. Изменения NDVI как индикатор динамики экологического состояния ландшафтов (на примере восточной части Полесской провинции) // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. 2020. № 1. С. 101–107.
- Девликамов Э.Р., Тепляшина М.А. Горячие точки морских млекопитающих в приполярной Арктике // Современная наука, общество и образование: актуальные вопросы, достижения и инновации. Т. 1. Пенза: Наука и просвещение, 2022. С. 232–234.
- Добрякова В.А., Добряков А.Б. Анализ миграционных процессов в Тюменской области // Географический вестник. 2021. № 1(56). С. 42–52.
- Добрякова В.А., Москвина Н.Н., Жегалина Л.Ф. Статистика Getis-Ord Gi* при обработке многолетних данных содержания углеводов в бассейне реки Большой Балык // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 5. С. 54–64.
- Донгак Д.А.-С., Монгуш А.В., Монгуш Ч.Б., Чулдум Ш.О. Дистанционное изучение сезонной динамики вегетационного индекса (NDVI) растительного покрова массива Монгун-Тайга // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11. № 4. С. 22–29.
- Еремеева А.П. Пространственные масштабы проявления факторов дифференциации ландшафтов Буртинской степи (Оренбургье) // Вестник Московского университета, серия 5 география. 2012. № 4. С. 48–53.
- Калмыкова О.Г. О растительном покрове Госзаповедника “Оренбургский” // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1(4). С. 1024–1026.
- Колотухин А.Ю., Бармин А.Н., Валов М.В., Синцов А.В. Исследование сезонной динамики индекса NDVI на территории Богдинско-Баскунчакского заповедника // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. Т. 4 (70). 2018. № 1. С. 131–140.
- Михайлов Н.Н., Михайлова Л.А., Харламова Н.Ф., Лхагвасурэн Ч. Использование временных рядов вегетационного индекса NDVI для мониторинга растительного покрова степной зоны Западной Сибири // Научные ведомости. Серия Естественные науки. 2010. № 15 (86). Вып. 12. С. 25–33.
- Мячина К.В., Керимов И.А., Дубровская С.А., Ряхов Р.В., Щавелев А.Н., Безбородникова Р.М. Анализ секвентационного потенциала геосистем на основе расчетов NDVI по спутниковым данным // Известия вузов “Геодезия и аэрофотосъемка”. 2022. Т. 66. № 5. С. 60–72.
- Работнов Т.А. Фитоценология. Москва: Изд-во МГУ, 1992. 350 с.
- Рулев А.С., Юфеев В.Г., Юфеев М.В. Геоинформационное картографирование и моделирование эрозионных ландшафтов. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2015. 153 с.
- Рябинина З.Н., Князев М.С. Определитель сосудистых растений Оренбургской области. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 268 с.
- Савин И.Ю., Танов Э.Р., Харзинов С. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки качества почв пашни (на примере Баксанского района Кабардино-Балкарии) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 77. С. 51–65.
- Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с.
- Спивак Л.Ф., Батырбаева М.Ж., Витковская И.С., Муратова Н.Р., Исламгулова А.Ф. Пространственно-временные особенности изменения состояния степной растительности Казахстана по данным спутниковой съемки // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 3. С. 116–145.
- Терехин Э.А. Распознавание залежных земель на основе сезонных значений вегетационного индекса NDVI // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41. № 5. С. 719–725.
- Терехин Э.А. Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 111–123.
- Титлянова А.А., Базилович Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедова Л.Г., Семенюк Н.В., Тишков А.А., Ти Тран, Хакимзянова Ф.И., Шатохина Н.Г., Кыргыс Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.
- Хорошев А.В. Функционально-динамический подход к исследованию ландшафтных границ // Региональные исследования. 2022. № 3. С. 60–70.
- Хорошев А.В., Еремеева А.П., Мерекалова К.А. Оценка межкомпонентных связей в Степном и таежном ландшафтах с учетом изменяемой пространственной единицы // Известия Русского географического общества. 2013. Т. 145. № 3. С. 32–42.
- Хорошев А.В., Калмыкова О.Г., Дусаева Г.Х. Оценка индекса NDVI как источника информации о наземной фитомассе в степях // Исследование Земли из космоса. 2023. № 3. С. 27–43.
<https://doi.org/10.31857/S020596142303003X>
- Чибилёв А.А., Паришина В.П., Мусихин Г.Д., Рябинина З.Н., Самигуллин Г.М., Немков В.А., Классен Д.В., Павлейчик В.М., Сергеев А.Д. Степной заповедник “Оренбургский”. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 1996. 76 с.
- Шинкаренко С.С. Анализ динамики пастбищных ландшафтов в аридных условиях на основе нормализованного вегетационного индекса (NDVI) // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 1 (37). С. 110–114.
- Шинкаренко С.С., Бодрова В.Н., Сидорова Н.В. Влияние экспозиции склонов на сезонную динамику вегетационного индекса NDVI посевных площадей //

- Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1(53). С. 96–105.
- Chandra S.P., Saha A., Chowdhuri I., Ruidas D., Chakraborty R., Roy P., Shit M. Earthquake hotspot and coldspot: Where, why and how? // *Geosystems and Geoenvironment*. V. 2. Issue 1. 2023. 100130.
- Khan D., Rossen L.M., Hamilton B.E., He Y., Wei R., Dienes E. Hot spots, cluster detection and spatial outlier analysis of teen birth rates in the U.S., 2003–2012 // *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*. V. 21. 2017. P. 67–75.
- Khoroshev A.V. Dynamics of phytoproductive functioning of low-mountain steppe landscapes of the Southern Urals // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 817. 012046.
- Kuznetsov A., Sadovskaya V. Spatial variation and hotspot detection of COVID-19 cases in Kazakhstan, 2020 // *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*. 2021. V. 39. 100430.
- Li Z., Liu S., Zhang X., West T.O., Ogle S.M., Zhou N. Evaluating land cover influences on model uncertainties – A case study of cropland carbon dynamics in the Mid-Continent Intensive Campaign region // *Ecological Modelling*. 2016. V. 337. P. 176–187.
- Liu Y., Cheng Z., Li X. How to prevent and control community risks? Identifying community burglary risk hotspots based on time-space characteristics // *J. Safety Science and Resilience*. 2023. V. 4. Issue 2. P. 130–138.
- Lyle G., Lewis M., Ostendorf B. Testing the temporal ability of Landsat imagery and precision agriculture technology to provide high resolution historical estimates of wheat yield at the farm scale // *Remote Sensing*. 2013. V. 5. P. 1549–1567.
- 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*. 2018. V. 151. P. 41–49.
- Nallan S.A., Armstrong L.J., Tripathy A.K., Teluguntla P. Hot spot analysis using NDVI data for impact assessment of watershed development // 2015 International Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD-2015), Feb. 04–06, 2015, Mumbai, India. P. 1–6.
- Nemeth S.C., Mauslein J.A., Stapley C. The primacy of the local: Identifying terrorist hot spots using geographic information systems // *J. Politics*. 2014. V. 76. № 2. P. 304–317.
- Ranagalage M., Estoque R.C., Zhang X., Murayama Y. Spatial changes of urban heat island formation in the Colombo District, Sri Lanka: implications for sustainability planning // *Sustainability*. 2018. V. 10. 1367.
- Senay G.B., Elliott R.L. Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation // *Forest Ecology and Management*. 2000. V. 128. P. 83–91.
- Siljander M., Uusitalo R., Pellikka P., Isosomppi S., Vapalahti O. Spatiotemporal clustering patterns and sociodemographic determinants of COVID-19 (SARS-CoV-2) infections in Helsinki, Finland // *Spatial and Spatio-temporal Epidemiology*. 2022. V. 41. 100493.
- Vallarta-Robledo J.R., Sandoval J.L., De Ridder D., Ladoy A., Marques-Vidal P., Humair J.-P., Cornuz J., Probst-Hensch N., Schaffner E., Stringhini S., Joost S., Guessous I. Spatial clusters of daily tobacco consumption before and after a smoke-free policy implementation // *Health & Place*. 2021. V. 70. 102616.

Dynamics of Phytomass Spatial Organization in a Reserved Steppe Landscape: Case Study of Burtynskaya Steppe, Orenburg Reserve

A. V. Khoroshev¹ and A. P. Ashikhmin^{1, #}

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskiye gory, 1, Moscow, 119991 Russia

[#]e-mail: avkh1970@yandex.ru

The “hot spot analysis” was applied to materials from 51 Landsat satellite images using the example of the “Burtynskaya Steppe” area of the Orenburgsky Nature Reserve, to study the dynamics of areas of positive phytomass anomalies relative to a neighborhood with a radius of 300 m. The purpose of the study was to establish the dependence of the variability of areas of increased phytomass on the landscape structure and hydrothermal conditions. We concluded that the switching of phytocenoses in transition zones from steppe to meadow type of functioning is ensured by varying the ratio of xerophytes and mesophytes depending on fluctuations in hydrothermal conditions. The frequency and area of positive phytomass anomalies in the bottoms of gullies correlates with their area on partially forested slopes, which indicates the positive role of forest vegetation in the stabilization of moisture influx into the bottoms. In deforested catchment areas of the south-facing slopes, the area of positive phytomass anomalies is determined by the supply of snow moisture, and in the catchment areas of north-facing slopes, by warm-period precipitation. The binding factors for the most stable positive anomalies of phytomass are the moisture convergence and the landform concavity rather than the catchment area.

Keywords: steppe, NDVI, hot spot analysis, area, dynamics, relief, hydrothermal conditions