

ЛАНДШАФТНЫЕ ФАКТОРЫ ВАРЬИРОВАНИЯ ФИТОМАССЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ОРЕНБУРГСКОГО ПРЕДУРАЛЬЯ

Н.В. Ильинова¹, А.В. Хорошев²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения*

¹ *Аспирант; e-mail: ilinova_nv@mail.ru*

² *Проф., д-р геогр. наук; e-mail: avkh1970@yandex.ru*

Предсказуемость и малое внутриполевое варьирование урожаев – фактор эффективности сельского хозяйства. Зависимость продуктивности от гидротермических условий может определяться пространственной структурой ландшафта. На примере степного агроландшафта в Оренбургской области анализировалось влияние площадных и качественных характеристик ландшафтного соседства на внутриполевую вариабельность зеленой фитомассы. Использованы вегетационные индексы NDVI для 92 полевых участков с обычной площадью 100 га по 42 космоснимкам Landsat за 30-летний период в среднем по 4–6 за сезон. В качестве зависимой переменной рассматривались NDVI полевых пикселей, в качестве независимых – площади эрозионных форм и живых лесополос и суммарный NDVI лесополос в окрестности радиусом 150 м. Виды культур, свойства лесополос и ложбин описывались при полевых исследованиях. Кластерный анализ применялся для распознавания видов культур по сходству годового хода NDVI с таковыми в годы полевых наблюдений. Мультирегрессионные уравнения составлялись для расчетов суммарного вклада трех факторов соседства во внутриполевое варьирование фитомассы и их вкладов по отдельности. Параметры уравнений сравнивались для июньских дат за три года с различной тепловлагообеспеченностью. Установлено, что внутриполевое варьирование зеленой фитомассы может быть более чем наполовину обусловлено факторами ландшафтного соседства с эрозионными формами и лесополосами. Поля классифицированы по степени стабильности влияния лесополос и ложбин при разных гидротермических условиях. Наиболее стабильное влияние на зеленую фитомассу культур оказывает соседство с эрозионными формами рельефа, наименьшее – состояние лесополос. Для 44% площади исследования зависимость зеленой фитомассы от ландшафтного соседства стабильна от года к году и статистически значима. Соседство с лесополосами и их состояние сильнее влияют на июньскую фитомассу в жаркие и сухие годы, а близость к эрозионным формам – в годы с обильным зимним и весенним увлажнением. С приближением к лесополосам фитомасса растет почти на всех полях. Площадь смежных живых лесонасаждений имеет большее значение, чем их состояние. Установлены пороговые значения соседств с эрозионными формами и живыми лесополосами, при достижении которых зеленая фитомасса на плакорах возрастает. Достоверное влияние факторов соседства на фитомассу проявляется вне зависимости от вида культур.

Ключевые слова: агроландшафт, NDVI, соседство, лесополоса, ложбина, гидротермические условия

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.6

ВВЕДЕНИЕ

При разработке моделей, описывающих связь урожайности сельскохозяйственных культур и внешних факторов, наиболее значимым фактором считается временная устойчивость видов зависимости. Для аграрного сектора важно определить, какие поля обеспечивают стабильный и предсказуемый урожай в течение многих лет, а на каких урожайность сильно зависит от гидротермических условий конкретного года и сезона.

Пространственные модели значительно улучшают точность прогноза урожайности [Blackmore et al., 2003]. С другой стороны, актуальна проблема равномерности условий роста культур в пределах полевого участка. Таким образом, определяют-

ся задачи, непосредственно связанные с областью ландшафтно-экологических исследований: на мезоуровне (примерно ранга местности) – выявление свойств ландшафтной структуры, определяющих различную стабильность урожайности на полевых участках; на микроуровне (примерно ранга урочища) – анализ причин внутриполевой изменчивости фитопродуктивного процесса.

Одним из центральных сюжетов ландшафтоведения всегда считалась взаимозависимость пространственных и временных характеристик. Ключевой вопрос можно сформулировать следующим образом: при каких свойствах пространственной структуры (составе, пропорциях, размещении, размерах, ориентации, латеральных связях) дости-

гаются те или иные характеристики временной изменчивости свойств (минимальной, максимальной, цикличной и др.). Применительно к сельскому хозяйству возможным направлением повышения продуктивности может быть «страховка» урожайности на случай резких гидротермических флуктуаций посредством оптимизации взаиморасположения и взаимодействий полевых участков с лесополосами, эрозионными формами и другими объектами как одной из задач адаптивно-ландшафтного земледелия [Кирюшин, 2018]. Необходимо установить, как изменение гидротермических условий влияет на чувствительность урожайности к соседним или внутренним объектам на полевых участках (например, ложбин и западин). Для этого требуется сравнить виды зависимости между урожайностью и пространственными характеристиками агроландшафта для гидротермически контрастных периодов в сезонном и многолетнем аспектах.

Исследования пространственно-временной организации фитопродукционного процесса в агроландшафтах проводятся в основном по двум направлениям. Во-первых, определяется зависимость урожайности по полемому участку в целом от климатических трендов [Eckert et al., 2015; Detsch et al., 2016] (мезоуровень). Во-вторых, изучается зависимость внутриполевого варьирования урожайности от пространственной неоднородности микрорельефа и почв, особенно в связи с разработкой технологий точного земледелия [Verhulst, Govaerts, 2010; Lyle et al., 2013; Гулянов, 2020] (микроуровень). Перспективно исследование влияния смежных природных и антропогенных объектов (в частности лесополос и форм рельефа) на внутриполевое варьирование [Манаенков и др., 2023].

Современные общедоступные дистанционные технологии дают возможность оценить степень варьирования фитомассы в пределах как полевых участков, так и лесополос. Наиболее применяемый метод – измерение нормализованных разностных вегетационных индексов (NDVI) в пикселях с линейным размером от нескольких метров до нескольких десятков метров. Ограничивающими факторами служат разрешение дистанционных материалов и финансовые возможности сельхозпроизводителей по их приобретению. Пространственное разрешение снимков MODIS (250 м), которые обеспечивают интервал съемки 16 суток, подходит только для исследований глобального и регионального масштабных уровней, но неадекватно для исследования внутриполевого варьирования и влияния лесополос. Также применяются снимки сверхвысокого разрешения и данные с квадрокоптеров [Mahajan, 2016], что требует больших финансовых затрат. Разрешение спутников LANDSAT (30 м) лучше по-

зволяет решать эти задачи, несмотря на недостаточность подходящих по качеству серий изображений за сопоставимые сроки.

Результаты дистанционных исследований продуктивности свидетельствуют о значимой положительной зависимости между значениями вегетационных индексов и урожайностью культур [Duan et al., 2017]. Современные технологии позволяют верифицировать значения индексов, полученных по космоснимкам, наземными радиометрами в детальном масштабе [Johansen, Tømmervik, 2014; Гулянов, 2019]. Основные требования к исследованиям пространственно-временных закономерностей функционирования агроландшафта таковы: наличие длинного временного ряда космоснимков; наличие достаточно большого количества (десятки) сравнимых, но не полностью идентичных, по размерам и ландшафтным условиям полевых участков; наличие информации о севооборотах и агротехнических мероприятиях. Выполнение последнего условия наиболее проблематично, в том числе из-за несохранности архивов или нежелания землепользователей предоставлять такую информацию. Тем не менее по различиям сезонного хода фитомассы можно если и не установить точно культуру, то классифицировать поля по этапам севооборота в данный год.

Многие авторы при оценке влияния факторов воздействия на растительность учитывают только внешний климатический фактор. Особенно это характерно при выявлении связей между растительностью и количеством выпавших осадков в аридных и семиаридных ландшафтах, где климатический фактор является наиболее преобладающим и жизненно необходимым для формирования растительных сообществ [Birtwistle et al., 2016]. В то же время обращается внимание на необходимость количественных оценок вкладов абиотических факторов (геологическое строение, рельеф, почва) и, особенно, их синергетических эффектов с гидротермическими [Глазунов и др., 2018].

С другой стороны, пространственное варьирование биопродуктивности и урожайности может определяться эмерджентными эффектами пространственной структуры, т. е. результатами взаимодействия между ландшафтными единицами. Для агроландшафтов Северного Казахстана установлено, что урожайность зерновых культур в степях зависит от количественного соотношения урочищ, способных рассеивать либо накапливать влагу, и от ландшафтных соседств [Хорошев и др., 2018; Kiryanov-Gref et al., 2024]. Методическая трудность сравнительного анализа вкладов факторов состоит в пространственной нестационарности, т. е. в изменчивости вкладов по территории. В связи с этим возникает задача сравнения видов зависимости

между территориальными единицами, например полевыми участками.

Даже при гомогенности фациальных условий внутри полевого участка позиционный фактор, т. е. расстояние до соседнего пространственного элемента (лесополосы, дороги, эрозионной формы, западины и др.) может служить самостоятельным фактором пространственной дифференциации (обратимой или необратимой) посредством меняющейся интенсивности потоков веществ и энергии. В сельском хозяйстве это создает трудности из-за неравномерных снеготаяния, прогревания и подсыхания почвы, времени начала вегетации, скорости прохождения вегетационных фаз, эффективности усвоения удобрений, обилия сорняков и др. [Киришин, 2018].

Целью данной работы была количественная оценка изменчивости тесноты связей между ландшафтными (т. е. связанными с пространственной гетерогенностью) факторами и внутривертевой вариативностью зеленой фитомассы на основании

значений NDVI. Под ландшафтными факторами в данном случае понималось соседство с отрицательными формами микрорельефа и лесополосами разного состояния. Решались задачи: оценить вклад факторов соседства в пространственную вариативность фитомассы полевых участков; установить меру изменчивости вкладов факторов соседства в зависимости от гидротермических флуктуаций; сравнить группы сельскохозяйственных культур по чувствительности внутривертевой вариативности фитомассы от факторов соседства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено на примере 92 полевых участков в Беляевском районе Оренбургской области вблизи пос. Буртинский на междуречье рек Урал и Илек (рис. 1). Территория расположена на Подуральском плато Восточно-Европейской равнины и относится к Урало-Илекской южно-степной провинции.

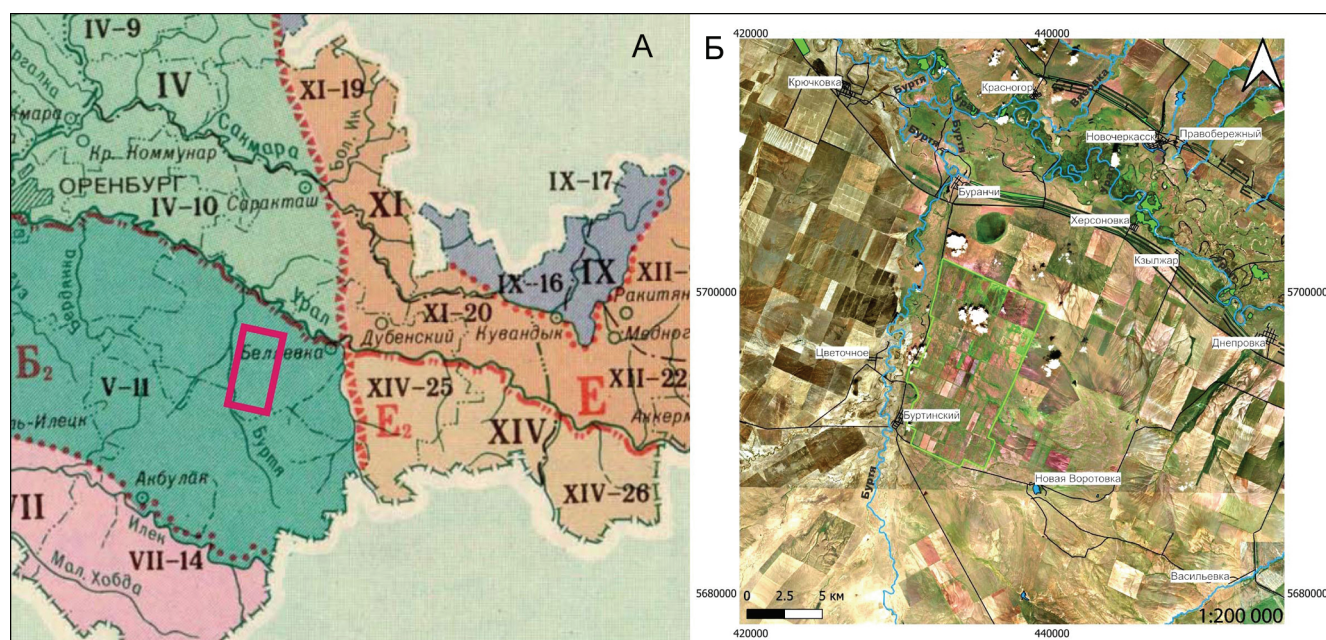


Рис. 1. Расположение полигона исследования: А – фрагмент ландшафтной карты Оренбургской области [Атлас..., 1993]; Б – границы полигона исследования на фоне космического снимка. *Источник:* Bing satellite

Fig. 1. Location of the study area: А – a fragment of a landscape map of the Orenburg region [Atlas..., 1993]; Б – the boundaries of the study area against the background of a satellite image. *Source:* Bing satellite

Территория имеет общий северо-западный уклон до 1° к реке Буртя в диапазоне высот 117–150 м. Литогенную основу на севере и в центральной части составляют эоплейстоценовые озерно-аллювиальные супеси и суглинки, плавно переходящие в восточной в плейстоценовый супесчано-суглинистый делювий. Распространено два вида малых эрозионных форм: ложбины (преобладают на полигоне) и промоины. Ложбины на полях перепа-

хиваются, их склоны пологие, крутизна составляет первые градусы ($2-5^\circ$), перепад высот – первые метры, ширина днища – 5–7 м (рис. 2). Промоины на полигоне представлены единично, характеризуются более крутыми склонами ($6-10^\circ$), не распахиваются, ширина днища составляет до 4 м, перепад высот от 2 до 4 м, местами встречается оглеение почв. Смытость почв на склонах ложбин индицируется более светлым пахотным горизонтом. Типичное

значение эрозионной расчлененности для полей составляет 15% от площади поля.

Годовая сумма осадков варьирует от 300 до 400 мм, в среднем – 319 мм (по данным метеостанции Беляевка в 20 км к востоку от полигона). Снежный покров устанавливается к ноябрю и держится в среднем 139 дней; средняя высота 23–31 см, запасы воды в снеге – от 70 до 87 мм [Климентьев, 2005]. Наиболее непостоянные осадки характерны для июля, их вариация достигает 80%.

Почвы представлены южными черноземами, карбонатными обычно с поверхности или в пахотном горизонте. В днищах некоторых крупных балок присутствуют следы оглеения. В ложбинах и понижениях встречается щебень коренных пород. Присутствуют признаки засоления, выражающиеся в широком распространении галофитных рас-

тительных сообществ (*Bassia scoparia*) преимущественно в восточной части полигона.

В исследование включена территория площадью 13 тыс. га, на которой размещены 92 полевых участка. Большинство полей имеет размеры 2000×500 м. Около 20% территории полигона исследования распахивается не ежегодно; среди них примерно половина используется под многолетние кормовые травы (преимущественно житняк), другая половина представляет собой зарастающие залежи. Поля разделены сетью полезащитных лесополос разной степени сохранности, возраст посадок составляет около 60 лет, средняя ширина – около 30 м. На пашнях применяется зернопаропропашной севооборот. Выращиваются зерновые (пшеница, ячмень, овес) и масличные (рыжик, подсолнечник) культуры. Залежи постепенно зарастают вязом мелколистным (*Ulmus parvifolia*).

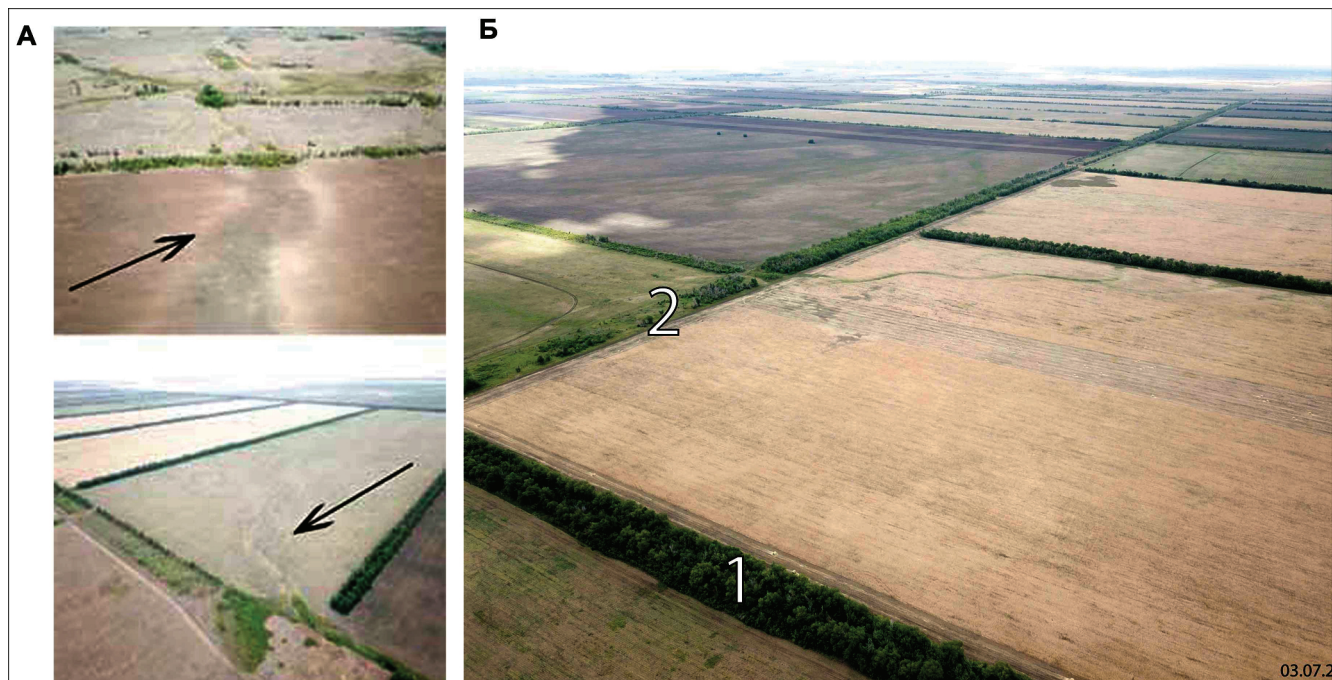


Рис. 2. Эрозионные формы и лесополосы на полевых участках: А – поля с распашкой и под многолетним житняком (стрелками показаны распахаваемые ложбины разной ширины); Б – лесополосы: 1 – живые (ширина 30 м); 2 – распадающиеся. Источник: фото с беспилотного летательного аппарата Mavic Pro

Fig. 2. Erosion landforms and forest belts in field areas: A – fields with plowing and under perennial grain crops; arrows indicate plowed hollows of different widths; Б – live (1, width 30 m) and decaying (2) forest belts. Source: Photo from the Mavic Pro UAV

Сеть лесополос, судя по измерениям на спилах деревьев, была заложена в 1960-х гг. Представлены вяз мелколистный, клен ясенелистный (*Acer negundo*), клен татарский (*Acer tataricum*), тополь (*Populus canadensis*), яблоня, ясень, среди кустарников – лох серебристый (*Elaeagnus commutata*), боярышник (*Crataegus*), смородина (*Ribes*). Предположительно лесополосы проектировались как ажурные, однако впоследствии подверглись зарастанию, а в некоторых местах – распаду и отмиранию. Наиболее

благополучное состояние лесополос (т. е. качество) наблюдалось при пересечении ложбин. Средняя высота лесополос (H) составляет 10–14 м, для лесополос с участием тополя – 15–20 м.

В ходе предполевого этапа анализировались: цифровые модели рельефа ALOS (разрешение 30 м), SRTM (90 м); топографические карты (1 : 200 000); 42 космоснимка LANDSAT-5, 7, 8 за период с 1991 по 2021 г., в среднем по 4–6 снимков за сезон. Схема исследования отражена на рис. 3.



Рис. 3. Концептуальная схема исследования

Fig. 3. Conceptual diagram of the study

На полевом этапе (июнь 2021 и 2024 гг.) было выполнено 84 комплексных описания, включавших следующие показатели: географические координаты и абсолютная высота точки по GPS-навигатору; геолого-геоморфологические характеристики (принадлежность к мезоформе рельефа, экспозиция, крутизна, описание формы и характер поверхности, описание почвенных горизонтов (мощность почвенного покрова, гранулометрический состав, структура, влажность, реакция с HCl), видовой состав и проективное покрытие фитоценозов; в лесополосах – ярусы древостоя, их высота, средний диаметр, общая сомкнутость крон, подробно описывался подрост и подлесок. Осуществлена фото-съемка территории с квадрокоптера Mavic Pro.

Классификация космических изображений была выполнена в программе RStudio методом максимального правдоподобия на основе спектральных каналов 2, 3, 4 спутника LANDSAT-8 (снимок 04.08.2021), что позволило разделить живые лесополосы и безлесные участки (в том числе с погибшими лесополосами). В программах Rstudio и ArcGis 10.3 был рассчитан NDVI за 39 сроков с учетом атмосферной коррекции и облачности.

Эрозионные формы ввиду недоступности крупномасштабных топографических карт выделялись вручную по космическим снимкам, данным съемки

квадрокоптером с полевой верификацией по рельефу, видовому составу и покрытию травостоя.

На основе полученных растров NDVI, принадлежности пиксела к категориям лесополос или эрозионных форм вычислялась зональная статистика значений в определенной окрестности каждого пиксела. Поскольку влияние ажурных лесополос составляет около 10–15 высот деревьев [Черемисинов, Спахова, 2004], а средняя высота лесополос на территории полигона составляет 10–14 м, площадь и состояние лесополос оценивались в окрестности каждого пиксела радиусом 150 м. При этом учитывается, что некоторые участки лесополос погибли; они не участвовали в расчете площади. Предполагалось, что чем больше площадь живых лесопосадок и суммарное значение NDVI в пределах лесополосы, попавшей в заданную окрестность пиксела, тем больше зеленая фитомасса, тем лучше состояние лесополосы и тем большее влияние (позитивное или негативное) она может оказать на фитомассу полевого участка. Площадь эрозионных форм рассчитывалась в окрестности 150 м, что соответствует обычному расстоянию между ложбинами на полях с присутствием таковых. Считалось, что рост суммарной площади эрозионных форм в окрестности способствует большему накоплению снега и почвенной влаги, которая может путем диффузии рас-

пространяться в почвы плакорных поверхностей. Гипотеза заключалась в том, что рост влагозапасов способствует росту фитомассы сельскохозяйственных растений. С другой стороны, близость к эрозионным формам, даже при минимальных уклонах, во время весеннего снеготаяния может вызывать смыв почв, и тогда более вероятным становится снижение фитомассы. Расчет соседств с эрозионными формами производился в двух вариантах: только

для пикселей, находящихся за их пределами, и для всех пикселей поля. Эрозионная расчлененность полевого участка в целом рассчитывалась как доля площади эрозионных форм от общей площади.

Таким образом, было получено три растровых изображения, отображающих факторы ландшафтного соседства: 1) влияние эрозионных форм рельефа (рис. 4А); 2) влияние площади живых лесополос и их состояния (рис. 4Б).

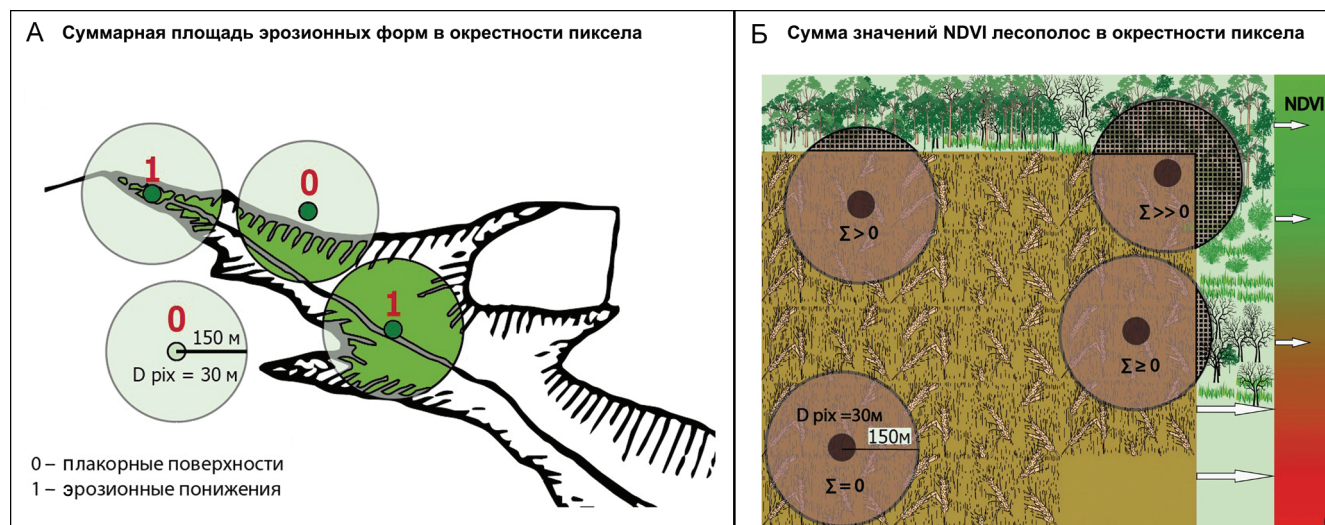


Рис. 4. Схема расчета характеристик ландшафтного соседства для значений NDVI в пикселях на полевых участках: А – по отношению к эрозионным формам рельефа; Б – по отношению к лесополосам

Fig. 4. Scheme for calculating the parameters of the landscape neighborhood for NDVI values in pixels at field sites: А – in relation to erosion landforms; Б – in relation to forest belts

Для оценки влияния гидротермических факторов на исследуемые связи были использованы данные метеостанции Беляевка: температуры и осадки месяца съемки и предыдущих весенних месяцев, а также сумма осадков за предшествующий период с устойчивыми отрицательными температурами (с ноября по март). Для сравнения вкладов трех факторов ландшафтного соседства на внутривариационную изменчивость NDVI выбраны данные за июнь двух контрастных по температуре и влажности лет – жаркого и очень сухого 2010 г. и среднего по теплообеспеченности и влажности (но с зимой и весной влажнее обычного) 2017 г., а также теплового и сухого 2021 г. как периода полевой верификации. Повторная верификация состояния лесополос и землепользования проведена в июне 2024 г.

Для исследования суммарного вклада трех факторов соседства и их вкладов по отдельности составлялись интегральные мультирегрессионные уравнения. В качестве зависимой переменной выбирались значения NDVI за 25.06.2021, 27.06.2010 и 30.06.2017, а в качестве независимых: а) сумма площадей эрозионных форм в радиусе 150 м;

б) то же – живых лесополос в окрестности 150 м; в) сумма NDVI лесополос в окрестности 150 м. Показателем суммарного вклада трех факторов был коэффициент детерминации (КД, доля объясненной дисперсии NDVI), показателями относительных вкладов отдельных факторов – модули стандартизованных регрессионных коэффициентов β . Характер влияния факторов на NDVI (позитивный или негативный) определялся по знаку регрессионных коэффициентов и коэффициентов корреляции Спирмена (K_{sp}).

Поскольку данные о выращиваемых культурах и агротехнических мерах за 2010 и 2017 гг. были недоступны, для распознавания классов растительного покрова был применен метод кластерного анализа (k -средних) к данным 2021 г., обеспеченного полевыми наблюдениями за видами культур. Мы исходили из гипотезы, что годовой ход NDVI различается в зависимости от сельскохозяйственной культуры и времени прорастания и скашивания. Различия форм кривых NDVI посевов ранее уже использовались для идентификации посевов зерновых культур на спутниковых снимках [Письман и др.,

2014]. Предполагалось, что, зная культуры 2021 и 2024 гг., можно по сходству годового хода предполагать, какие культуры выращивались на данном поле в другие годы. NDVI за несколько сроков (5–6 с датами с мая по сентябрь) каждого года наблюдений были сгруппированы в шесть кластеров на основании сходства сезонного хода NDVI. Тип покрова для поля определялся по преобладающему по площади кластеру. Затем применялся дисперсионный анализ для выявления достоверности различий в чувствительности NDVI к факторам соседства при разных классах покрова. В качестве зависимой переменной были использованы коэффициенты детерминации интегрального мультирегрессионного уравнения.

Для всех расчетов использовалась программа Statistica 7.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для трех сроков (конец июня 2010, 2017 и 2021 гг.), контрастных по гидротермическим условиям, зеленая фитомасса внутри полевого участка достоверно связана положительной корреляцией с долей и качеством лесополос и долей эрозионных форм в окрестности пиксела. Суммарная площадь смежных

живых лесопосадок оказалась значимой для NDVI на наибольшем количестве полей в наиболее жарком и сухом июне 2010 г. (после наиболее малоснежной зимы), суммарная площадь эрозионных форм – в 2017 г. после самой снежной зимы и влажной весны (табл.). Доля лесных пикселей в окрестности 150 м оказалась более значимой для NDVI полей, чем состояние лесополос, в 2010 и 2021 гг. После снежной зимы и влажной весны 2017 г. вклад фактора состояния лесополос был наибольшим.

Совокупный вклад трех факторов соседства в варьирование фитомассы и его межгодовая изменчивость оценивались по КД интегрального мультирегрессионного уравнения, составленного для каждого полевого участка. Наибольшая доля полей со значимыми интегральными уравнениями соседства (обычно с КД более 0,3) была характерна для 2017 г. – среднего по температуре, но с наиболее снежной зимой и влажной весной; наименьшая – для теплого 2021 г. со средней влагообеспеченностью лета и зимы (см. табл.). Интегральный вклад факторов соседства во внутривидовое варьирование фитомассы практически не зависит от средней абсолютной высоты поля и состава четвертичных отложений.

Таблица

Доля полей с разными интервалами значений коэффициента детерминации и коэффициентов корреляции, описывающих зависимость NDVI от факторов ландшафтного соседства, %

Статистический показатель связи	27.06.2010	30.06.2017	25.06.2021
	Характеристика погоды		
	Жаркий экстремально сухой после малоснежной зимы	Средний по теплообеспеченности после многоснежной зимы и влажной весны	Жаркий сухой после нормативной по осадкам зимы и сухой весны
<i>Коэффициент детерминации интегрального уравнения зависимости NDVI от суммарной площади эрозионных форм и лесополос и суммарного NDVI лесополос в окрестности 150 м</i>			
Более 0,3, в т. ч. 0,5–0,6	19 3	22 7	16 0
<i>Коэффициент Спирмена для связи NDVI с площадью эрозионных форм в окрестности 150 м</i>			
Более 0,3, в т. ч. 0,5–0,6 в т. ч. более 0,6	17 3 0	32 10 4	21 3 1
<i>Коэффициент Спирмена для связи NDVI с площадью живых лесопосадок в окрестности 150 м</i>			
Более 0,3, в т. ч. 0,5–0,6 в т. ч. более 0,6	77 23 18	62 21 11	64 10 11

Сравнение вкладов факторов соседства в июне и июле показало постепенное снижение значимости соседства с эрозионными формами в жаркие годы: КД регрессионного уравнения в 2010 г. в июне составил 0,18, а в июле – 0,06 (не значим); в 2021 – 0,13 и

0,04 соответственно, в 2017 г. не менялся. Вклад факторов соседства с лесополосами постоянно достоверен, но в сухие годы уменьшился от июня к июлю (в 2010 г. КД составил 0,29 и 0,24 соответственно), а в более влажном 2017 г. не изменился (0,21 и 0,20).

Для всех 92 полевых участков по трем срокам прослеживалась сильная положительная зависимость (K_{sp} 0,61...0,67) между эрозионной расчлененностью и вкладом пространственной структуры в варьирование фитомассы (КД интегрального уравнения) (рис. 5). В то же время среди наиболее эрозионно-расчлененных полевых участков (с долей ложбин более 25%) выявлены группы с большим и малым вкладом факторов соседства.

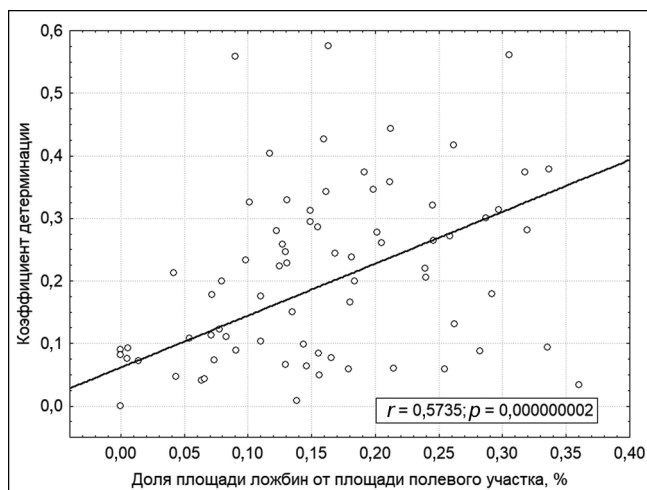


Рис. 5. Зависимость коэффициента детерминации интегрального мультирегрессионного уравнения вклада факторов соседства во внутриполевое варьирование NDVI от площадной доли эрозионных форм. Указаны коэффициент корреляции Пирсона (r) и уровень значимости (p)

Fig. 5. Dependence of the coefficient of determination of the integral multi-regression equation for the contribution of neighborhood factors to the intra-field variation of NDVI on the area fraction of erosion forms. The Pearson correlation coefficient (r) and significance level (p) are indicated.

Для группы полей с большим вкладом факторов соседства зависимость NDVI от соседства с ложбинами для всех трех сроков оказалась достоверно положительной с коэффициентом корреляции от 0,3 до 0,6 (рис. 6). Методом кусочно-линейной регрессии установлено, что если в окрестности любого пикселя поля радиусом 150 м более 15% территории приходится на эрозионные формы, то NDVI в летний период начинает заметно возрастать. В то же время в апреле сразу после снеготаяния закономерность противоположна, поскольку вегетация раньше начинается на межложбинном пространстве. В целом рост NDVI по мере роста эрозионной расчлененности в окрестности начинает ярко проявляться во второй половине июня, т. е. в период наиболее активного формирования зеленой массы сельскохозяйственных культур. В августе вид зависимости сильно варьирует в связи с этапами севооборота. В сентябре положи-

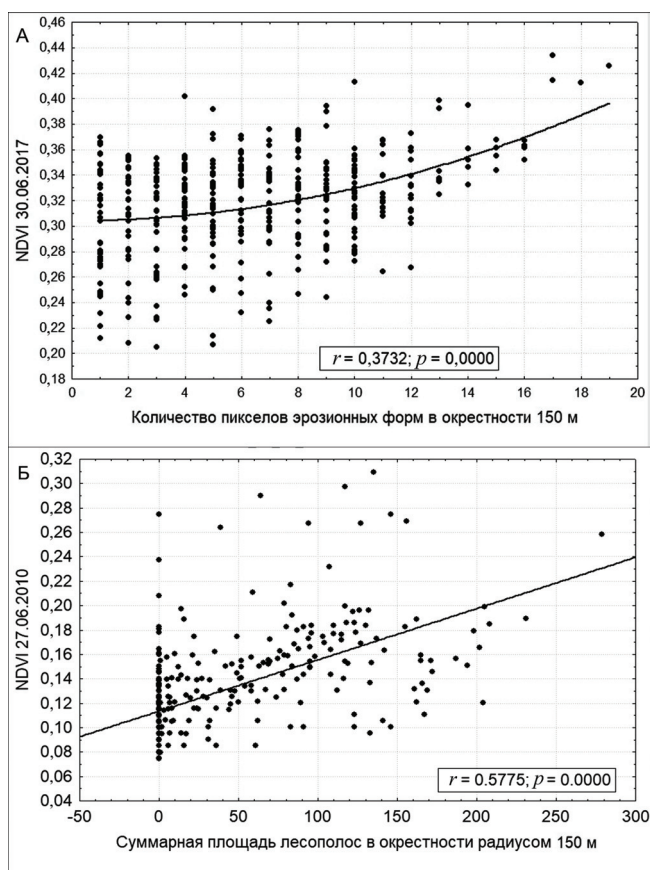


Рис. 6. Зависимость NDVI плакорных единиц на полевом участке № 7: А – от площади эрозионных форм в окрестности 150 м (1 пиксел – 900 м²) 30 июня 2017 г.; Б – от площади живых лесополос в окрестности 150 м 27 июня 2010 г. Из расчета исключены пиксели, в окрестностях которых радиусом 150 м отсутствуют эрозионные формы. Указаны коэффициент корреляции Пирсона (r) и уровень значимости (p)

Fig. 6. Dependence of NDVI of upland units at no. 7 field site: А – on the area of erosion forms within the distance of 150 m (1 pixel – 900 m²), June 30, 2017; Б – on the area of alive forest belts within the distance of 150 m, June 27, 2010. The calculation excludes pixels which have no erosion landforms within a radius of 150 m. The Pearson correlation coefficient (r) and significance level (p) are indicated

тельная зависимость может возникать в отдельные годы.

В другой группе полевых участков, несмотря на высокую эрозионную расчлененность, вклад ландшафтных, т. е. пространственных, факторов во внутриполевую вариабельность NDVI был наименьшим. Все эти участки почти ежегодно распахиваются, и агротехнические мероприятия нивелируют значение ландшафтного соседства. Однако и в этой группе в жарком сухом 2010 г. проявилась сильная зависимость зеленой фитомассы от состояния смежных лесополос.

Для количественного сопоставления вкладов каждого фактора соседства и его стабильности сравнивались стандартизованные регрессионные

коэффициенты интегрального уравнения. Если КД составлял более 0,25 (т. е., как правило, уравнение статистически значимо при $p < 0,05$), то фактор с максимальным по модулю коэффициентом β для этого поля наносился на карту (рис. 7). На 58 участках ландшафтное соседство так или иначе оказывало значимое влияние на внутриверхнее варьирование зеленой фитомассы (КД более 0,25). На остальных 34 участках внутриверхнее варьирование определя-

ется в основном технологическими причинами или неучтенной фациальной неоднородностью (например, засоленностью почв, микрорельефом и др.).

Значимость ландшафтного соседства оказалась неодинаковой в зависимости от гидротермических условий конкретного года. На 18 из 92 полей (20%) влияние факторов велико и устойчиво по всем трем срокам. Еще на 20 полях (22%) зависимость возникает периодически.

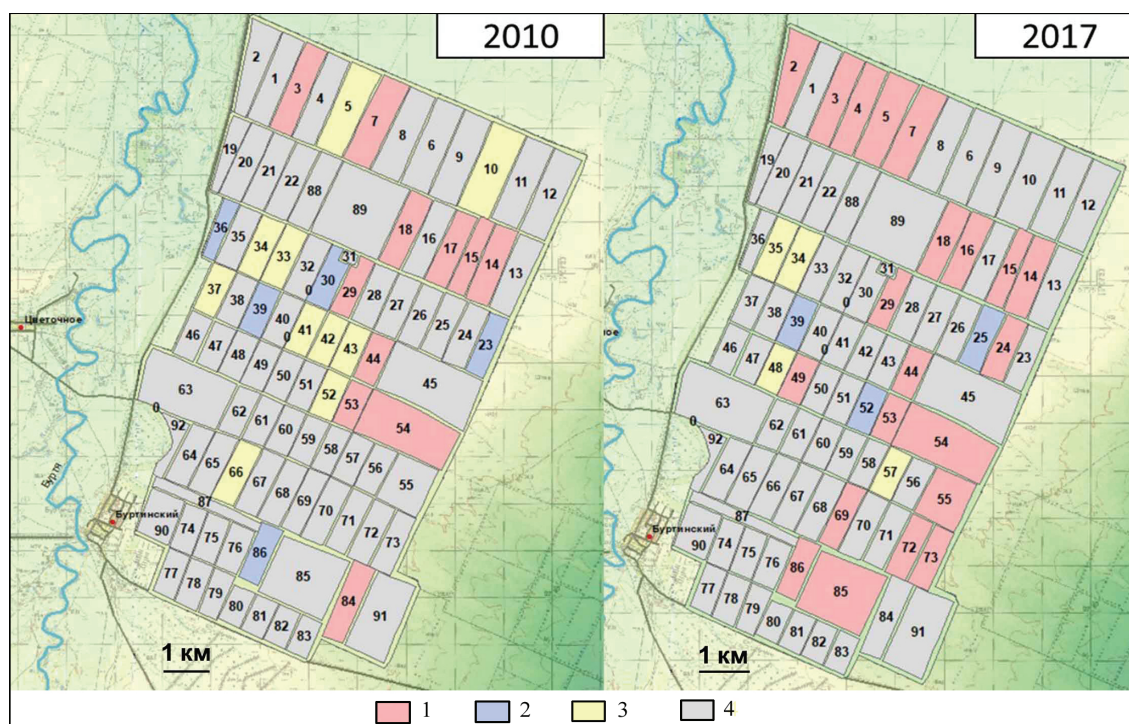


Рис. 7. Классификация полевых участков по относительным вкладам факторов ландшафтного соседства во внутриверхнее варьирование NDVI в июне 2010 и 2017 гг. Преобладающий вклад факторов: 1 – соседство с эрозийными формами; 2 – состояние лесополос; 3 – суммарная площадь лесополос в окрестности 150 м; 4 – значение факторов соседства недостаточно

Fig. 7. Classification of field sites according to the relative contributions of landscape neighborhood factors to intra-field variation of NDVI in June 2010 and 2017. The predominant contribution of factors: 1 – proximity to erosion landforms; 2 – state of forest belts; 3 – the total area of forest belts within the distance of 150 m; 4 – the value of neighborhood factors is unreliable

Для 9 полей с достоверным позитивным влиянием площади лесополос значения коэффициента корреляции достигают 0,4–0,5 (см. рис. 6Б). Данная группа полей представлена как посевами многолетних трав, так и ежегодно распаханых полями. Поэтому можно считать, что положительная связь фитомассы в июне с площадью смежных лесополос происходит независимо от выращиваемой культуры и не зависит от распространения поросли древесных пород на залежах. Состояние лесополос, окружающих эти поля, благополучное с минимальным участием сухостоя. Методом кусочно-линейной регрессии установлено, что при нахождении в окрест-

ности 150 м 0,45 га и более лесополос, зеленая фитомасса полевых пикселей существенно возрастает по сравнению с пикселями, удаленными от лесополос или соседствующими с погибшими насаждениями.

Методом кластерного анализа по годовому ходу NDVI распознаны классы растительного покрова за каждый из трех сроков: а) несколько видов культур с разными максимальными значениями и сроками уборки (пшеница, подсолнечник); б) угодья с многолетними кормовыми травами (скашиваемый в конце июня житняк); в) залежные участки со степными сообществами; г) зарастающие залежи с подростом вяза мелколистного, клена ясенелистного, то-

поля. Достоверные отличия интегрального вклада (КД) факторов соседства между классами покрова не обнаружены. При этом в сухом и жарком 2021 г. от эрозионной расчлененности и влияния лесополос в наибольшей степени зависела зеленая масса на полях с подсолнечником и пшеницей. В 2017 г. наиболее высокие значения вклада ландшафтных факторов наблюдались в классах залежей и многолетних кормовых трав.

На вклад позиционного фактора в формирование внутривополевого варьирования урожайности начали обращать пристальное внимание в течение последних десятилетий [Corwin, 2013]. Наше исследование показало значимость ландшафтных соседств и площадных соотношений элементов агроландшафта для устойчивости внутривоплевых контрастов зеленой фитомассы.

Пространственная структура природно-антропогенного агроландшафта наиболее сильно влияла на внутривополеное варьирование зеленой фитомассы во влажном 2017 г., который отличался повышенными июньскими влагозапасами в почве после снежной зимы и влажной весны. При этом основное значение имела близость плакорных участков полей к эрозионным формам рельефа. Поскольку во все сроки, кроме апрельских, преобладали положительные корреляции, можно утверждать, что возрастание фитомассы при близости эрозионных форм может возникать в результате увеличенного снегонакопления в ложбинах, его более длительного задержания в весенний период, роста влажности почвы и более близкого залегания грунтовых вод в засушливый летний период. Более редкое явление в июне – снижение NDVI с приближением плакорных пикселей к ложбинам (4–11% полей в зависимости от года с достоверными отрицательными корреляциями), что может объясняться смывом гумусового горизонта.

Ранее было установлено, что роль лесополос в формировании урожайности неоднозначна в зависимости от влажности конкретного года [Манаенков, 2023]. Наши данные подтверждают непостоянство зон влияния лесополос на внутривополеное варьирование фитомассы. Для жаркого и сухого 2010 г. обнаружено, что лесополосы играли роль в уменьшении испарения благодаря уменьшению скорости ветра. Однако более значимым фактором оказалась общая площадь лесополос, а не их качество. В более влажный 2017 г. воздействие лесополос на фитопродукционный процесс стало менее выраженным. Тем не менее в этот же год отмечено, что эрозионные формы рельефа способствовали сохранению зеленой массы. Это поддерживает гипотезу о том, что осадки в начальный период вегетации имеют большое значение для роста растений, где эрозионные формы способствуют сохранению влаги.

Значимость вклада состояния лесополос прослеживалась во все сроки наблюдений, но стабильно не повторялась ни для одного из полей. Следовательно, невозможно говорить о единой пространственной закономерности, описывающей повышенную чувствительность фитомассы к состоянию лесополос. Нестабильность влияния факторов соседства может быть объяснена влиянием не включенных в регрессионную модель факторов: внесения удобрений, агротехнических приемов и состояния почв (трофность, засоленность, смытость, мозаичность гранулометрического состава). Этим факторам обычно уделяется основное внимание в литературе по сельскохозяйственным наукам [Бадреев, 2008; Lyle et al., 2013; Епишева, 2020; Глазунов и др., 2018], однако при малом внимании к факторам соседства.

Лучше всего ландшафтные факторы объясняют изменчивость NDVI сельскохозяйственных полей в северной части полигона исследования. Данные участки расположены на террасах, ежегодно распахиваются и заняты однолетними культурами, что подтвердилось и в 2024 г. Наименее зависимыми от ландшафтного соседства оказались поля под многолетними кормовыми травами и залежами, расположенные в южной части полигона, частично приуроченные к денудационной равнине.

Попарные различия между классами растительного покрова по чувствительности к соседству за три июньских срока не выявлены. Поэтому правомерно утверждать, что ландшафтное соседство влияет на внутривополеное варьирование зеленой фитомассы независимо от того, какая именно культура выращивается на полевом участке в данный год. Однако в жаркие сухие годы наибольшая зависимость от ландшафтных факторов соседства характерна для полей с однолетними зерновыми и масличными культурами. Во влажные годы наибольшая значимость соседства характерна для полевых участков с наиболее близкими к естественным разнотравно-злаковыми сообществами на залежах или посевах многолетних кормовых злаков. Возможно, это свидетельствует об ослаблении значимости соседств по мере приближения восстановительной сукцессии к естественному функционированию степного ландшафта.

Проведенное исследование имеет ряд ограничений, связанных с дефицитом информации о севооборотах и агротехнических приемах. Так, был бы интересен ответ на вопрос, как ландшафтное соседство влияет на неравномерность сроков созревания культур внутри поля. Однако судить об этом на основании значений NDVI было бы некорректно. Фактически спутниковая съемка дает информацию только о времени скашивания, да и то не о точной дате, а о той дате, для которой спутник уже зафиксировал резкое уменьшение фи-

томассы по сравнению с предыдущим доступным снимком. Когда убирается урожай, то скашивание ведется одновременно на всем поле независимо от готовности отдельных его секторов. Перспективу решения вопроса мы видим в детальных наземных измерениях NDVI накануне уборки урожая средствами наземных радиометров. Подобный опыт уже имеется [Гулянов, 2019]. Кроме того, оценка значимости влагонакопления в эрозионных формах при недостатке топографических материалов могла бы быть уточнена в будущем построением цифровых моделей рельефа по снимкам с беспилотных летательных аппаратов.

ВЫВОДЫ

Внутриполевое варьирование зеленой фитомассы может быть более чем наполовину обусловлено факторами ландшафтного соседства с эрозионными формами и лесополосами. Наиболее стабильное влияние на зеленую фитомассу сельскохозяйственных культур оказывает фактор соседства с эрозионными формами рельефа, наименьшее – состояние лесополос.

Для 44% территории исследования зависимость зеленой фитомассы от ландшафтного соседства стабильна от года к году и высоко значима.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-17-00045). Авторы выражают благодарность О.Г. Калмыковой за содействие в организации полевых исследований и консультации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадреев Р.М. Влияние нормы высева, способов внесения и уровня азотного питания на урожайность и качество зерна многозерного и двузерного ячменя на черноземах южных Оренбургского Предуралья: дис. ... канд. с.-х. наук. Оренбург, 2008. 210 с.
- Глазунов Г.П., Гендугов В.М., Евдокимова М.В. и др. Выбор и проверка модели сезонной динамики показателей биомассы сельскохозяйственных культур с использованием вегетационных индексов // Материалы II Всероссийской научной конференции «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве». СПб.: ФГБНУ АФИ, 2018. С. 75–84.
- Гулянов Ю.А. Мониторинг фитометрических параметров с использованием инновационных методов сканирования посевов // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 3(19). С. 64–76. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76.
- Епишева Ю.Ю. Структура урожая и урожайность зерновых культур на черноземах южных Оренбургской области // Роль агрономической науки в оптимизации технологий возделывания сельскохозяйственных культур. Ижевск, 2020. С. 136–139.
- Кирюшин В.И. Экологические основы проектирования сельскохозяйственных ландшафтов. СПб.: КВАДРО, 2018. 568 с.
- Климентьев А.И. Почвенно-географическое районирование Оренбургской области // Вопросы степеведения. Оренбург, 2005. С. 83–95.
- Манаенков А.С., Подгаецкая П.М., Попов В.С. Влияние ползащитных лесных полос на развитие яровой пшеницы в приопушечной зоне посевов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. № 4. С. 97–106. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.9.
- Письман Т.И., Ботвич И.Ю., Сидько А.Ф. Определение сезонной динамики урожайности агроценозов на основе спутниковой информации и математической модели // Известия РАН. Серия биологическая. 2014. № 2. С. 196–202. DOI: 10.7868/s0002332914020106.
- Хорошев А.В., Ткач К.А., Муртазина Д.У. Влияние ландшафтной структуры на урожайность зерновых культур в степной зоне Казахстана // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2018. № 3. С. 62–69.
- Черемисинов А.Ю., Снахова А.С. Агроресомелиорация. Воронеж: ВГАУ, 2014. 212 с.
- Birtwistle A.M., Laituri M., Bledsoe B. et al. Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes, Journal of Arid Environments, 2016, vol. 131, p. 15–24.
- Blackmore S., Godwin R.J., Fountas S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years,

- Biosystems Engineering*, 2003, vol. 84, p. 455–466, DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00038-2.
- Corwin D. Site-specific management and delineating management zones, *Precision Agriculture for Food Security and Environmental Protection*, M. Oliver (ed.), Earthscan, London, UK, 2013, p. 135–157.
- Detsch F., Otte I., Appelhans T. et al. Seasonal and long-term vegetation dynamics from 1-km GIMMS-based NDVI time series at Mt. Kilimanjaro, Tanzania, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 178, p. 70–83, DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.007.
- Duan T., Chapman S.C., Guo Y. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle, *Field Crops Research*, 2017, vol. 210, p. 71–80, DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.025.
- Eckert S., Hüsler F., Liniger H. et al. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia, *Journal of Arid Environments*, 2015, vol. 113, p. 16–28, DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.001.
- Johansen B., Tømmervik H. The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, vol. 27, p. 20–30, DOI: 10.1016/j.jag.2013.07.001.
- Kiryanov-Gref F.K., Khoroshev A.V., Anatskaya K.A. Factors of intra-field phytomass variability in steppe agricultural landscapes of Kazakhstan, *Bulletin of the Karaganda University, "Biology. Medicine. Geography" Series*, 2024, vol. 29, iss. 1(113), p. 150–158, DOI: 10.31489/2024BMG1/150-158.
- 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, vol. 5, p. 1549–1567, DOI: 10.3390/rs5041549.
- Mahajan U., Bundel B.R. Drones for normalized difference vegetation index (NDVI), to estimate crop health for precision agriculture: A cheaper alternative for spatial satellite sensors, *Proceedings of the International Conference on Innovative Research in Agriculture, Food Science, Forestry, Horticulture, Aquaculture, Animal Sciences, Biodiversity, Ecological Sciences and Climate Change (AFHABEC-2016)*, Delhi, India, 2016, vol. 22, p. 31.
- Verhulst N., Govaerts B. The normalized difference vegetation index (NDVI) Green Seeker TM handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management, part A, *Concepts and case studies*, Mexico, D.F., 2010, DOI: 10.1016/j.funeco.2023.101233.

Поступила в редакцию 23.08.2024

После доработки 25.09.2024

Принята к публикации 15.10.2024

LANDSCAPE DRIVERS OF PHYTOMASS VARIATION ON AGRICULTURAL LANDS IN THE ORENBURG CIS-URALS

N.V. Ilinova¹, A.V. Khoroshev²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science

¹ Post-graduate student; e-mail: ilinova_nv@mail.ru

² Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: avkh1970@yandex.ru

Predictability and low intra-field variability of yields are the key interest of agriculture. The dependence of productivity on hydrothermal conditions could be determined by the spatial structure of landscape. We used the example of a steppe agricultural landscape in the Orenburg region to study the influence of the areal and qualitative characteristics of the landscape neighborhood on the intra-field variability of phytomass. We used vegetation indices (NDVI) for 92 field sites with a typical area of 100 hectares based on 42 Landsat satellite images over a 30-year period, with an average of 4–6 images per season. The NDVI of field pixels was considered as a dependent variable, while the areas of erosion landforms and live forest belts as well as the total NDVI of forest belts within the distance of 150 m were independent ones. Types of crops and the properties of forest belts and hollows were described during field studies. Cluster analysis was used to recognize crop classes based on the similarity of the annual NDVI variations to those during the years of field observations. Multiple regression equations were compiled to calculate the total contribution of three neighborhood factors to the intra-field variation in phytomass, as well as their individual contributions. We compared the parameters of the equations for June dates with different heat and moisture supply over three years. We found that the intra-field variation in green phytomass could be for more than a half determined by proximity to erosion forms and forest belts. The fields were classified according to the stability of the influence of forest belts and hollows under different hydrothermal conditions. The most stable influence on the green phytomass of crops is correlated with a proximity to erosion landforms, the least – with the state of forest belts. The dependence of green phytomass on landscape neighborhood was stable from year to year and highly significant for 44% of the study area. The proximity to forest belts and their state more strongly influence the June phytomass during hot and dry years, and proximity to erosion forms during years with abundant winter and spring precipitation. The closer to forest belts, the greater is phytomass in almost all fields. The area of adjacent live forest stands is more

important than their state. Threshold values have been established for neighborhoods with erosion landforms and live forest belts, which control the green phytomass increase within the interfluvies. A significant influence of neighborhood factors on phytomass is manifested regardless of the crop type.

Keywords: agricultural landscape, NDVI, neighborhood, forest belt, hollow, hydrothermal conditions

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 24-17-00045). The authors express their gratitude to O.G. Kalmykova for her assistance in the organization of field work and for consultations.

REFERENCES

- Badreev R.M. Vliyanie normy vyseva, sposobov vneseniya i urovnja azotnogo pitaniya na urozhaynost' i kachestvo zerna mnogorjadnogo i dvurjadnogo jachmenja na chernozemah juzhnyh orenburgskogo Predural'ja [The influence of seeding rate, application methods and nitrogen nutrition level on the yield and grain quality of multi-row and two-row barley on southern chernozems of the Orenburg Cis-Urals], Ph.D. Thesis, Orenburg, 2008, 210 p. (In Russian)
- Birtwistle A.M., Laituri M., Bledsoe B. et al. Using NDVI to measure precipitation in semi-arid landscapes, *Journal of Arid Environments*, 2016, vol. 131, p. 15–24.
- Blackmore S., Godwin R.J., Fountas S. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years, *Biosystems Engineering*, 2003, vol. 84, p. 455–466, DOI: 10.1016/S1537-5110(03)00038-2.
- Cheremisinov A.Yu., Spakhova A.S. *Agrolesomeliatsiya* [Agroforestry], Voronezh, VGU Publ., 2014, 212 p. (In Russian)
- Corwin D. Site-specific management and delineating management zones, *Precision Agriculture for Food Security and Environmental Protection*, M. Oliver (ed.), Earthscan, London, UK, 2013, p. 135–157.
- Detsch F., Otte I., Appelhans T. et al. Seasonal and long-term vegetation dynamics from 1-km GIMMS-based NDVI time series at Mt. Kilimanjaro, Tanzania, *Remote Sensing of Environment*, 2016, vol. 178, p. 70–83, DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.007.
- Duan T., Chapman S.C., Guo Y. et al. Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle, *Field Crops Research*, 2017, vol. 210, p. 71–80, DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.025.
- Eckert S., Hüsler F., Liniger H. et al. Trend analysis of MODIS NDVI time series for detecting land degradation and regeneration in Mongolia, *Journal of Arid Environments*, 2015, vol. 113, p. 16–28, DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.001.
- Episheva Yu.Yu. Struktura urozhaya i urozhaynost' zernovykh kul'tur na chernozemakh yuzhnykh Orenburgskoy oblasti [Structure of crop yield and productivity of grain crops on southern chernozem of the Orenburg region], *Rol' agronomicheskoy nauki v optimizatsii tekhnologiy vozdeleyvaniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [The role of agronomy in optimization of the crop cultivation technologies], Izhevsk, 2020, p. 136–139. (In Russian)
- Glazunov G.P., Gendugov V.M., Evdokimova M.V. et al. [Selection and testing of a model of seasonal dynamics of crop biomass using the vegetation indices], *Materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom khozyaystve"* [Materials of the II All-Russian Scientific Conference "Application of Earth Remote Sensing in Agriculture"], Sankt-Peterburg, FGBNU AFI Publ., 2018, p. 75–84. (In Russian)
- Gulyanov Yu.A. Monitoring fitometricheskikh parametrov s ispol'zovaniem innovatsionnykh metodov skanirovaniya posevov [Monitoring of phytometric parameters using innovative methods of scanning crops], *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki*, 2019, vol. 3, no. 19, p. 64–76, DOI: 10.33952/2542-0720-2019-3-19-64-76. (In Russian)
- Johansen B., Tømmervik H. The relationship between phytomass, NDVI and vegetation communities on Svalbard, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, vol. 27, p. 20–30, DOI: 10.1016/j.jag.2013.07.001.
- Khoroshev A.V., Tkach K.A., Murtazina D.U. Vliyanie landshaftnoy struktury na urozhaynost' zernovykh kul'tur v stepnoy zone Kazakhstana [The influence of landscape structure on the yield of grain crops in the steppe zone of Kazakhstan], *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Ser. 5, Geogr.*, 2018, vol. 73, no. 3, p. 62–69. (In Russian)
- Kiryanov-Gref F.K., Khoroshev A.V., Anatskaya K.A. Factors of intra-field phytomass variability in steppe agricultural landscapes of Kazakhstan, *Bulletin of the Karaganda University, "Biology. Medicine. Geography" Series*, 2024, vol. 29, iss. 1(113), p. 150–158, DOI: 10.31489/2024BMG1/150-158.
- Kiryushin V.I. *Ekologicheskie osnovy proektirovaniya sel'skokhozyaystvennykh landshaftov* [Ecological principles of designing agricultural landscapes.], Sankt-Peterburg, KVADRO Publ., 2018, 568 p. (In Russian)
- Kliment'ev A.I. [Soil-geographical zoning of the Orenburg region], *Voprosy stepevedeniya* [Issues in steppe studies], Orenburg, 2005, p. 83–95. (In Russian)
- 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, vol. 5, p. 1549–1567, DOI: 10.3390/rs5041549.
- Mahajan U., Bundel B.R. Drones for normalized difference vegetation index (NDVI), to estimate crop health for precision agriculture: A cheaper alternative for spatial satellite sensors, *Proceedings of the International Conference on Innovative Research in Agriculture, Food Science, Forestry, Horticulture, Aquaculture, Animal Sciences, Biodiversity, Ecological Sciences and Climate Change (AFHABEC-2016)*, Delhi, India, 2016, vol. 22, p. 31.
- Manaenkov A.S., Podgaetskaya P.M., Popov V.S. Vliyanie polezashchitnykh lesnykh polos na razvitie yarovoy pshenitsy v priopushchey zone posevov [The influence of forest belts on the development of spring wheat in the edge zone of crops], *Lomonosov Geography Journal*, 2023, vol. 78, no. 4, p. 97–106, DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.9. (In Russian)

Pis'man T.I., Botvich I.Yu., Sid'ko A.F. Opredelenie sezonnoy dinamiki urozhaynosti agrotsenozov na osnove sputnikovoy informatsii i matematicheskoy modeli [Determination of the seasonal dynamics of the yield of agrocenoses based on satellite information and a mathematical model], *Izv. Akad. Nauk, Ser. Biol.*, 2014, no. 2, p. 196–202, DOI: 10.7868/s0002332914020106. (In Russian)

Verhulst N., Govaerts B. *The normalized difference vegetation index (NDVI) Green Seeker TM handheld sensor: Toward the integrated evaluation of crop management, Part A, Concepts and case studies*, Mexico, D.F., 2010, DOI: 10.1016/j.funeco.2023.101233.

Received 23.08.2024

Revised 25.09.2024

Accepted 15.10.2024