

УДК 911.2(470.56)

А.В. Хорошев¹

ЛАНДШАФТНЫЕ УСЛОВИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ФИТОПРОДУКЦИОННОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В АЙТУАРСКОЙ СТЕПИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Зависимость устойчивости функционирования ландшафта от его пространственной структуры относится к актуальным вопросам исследований ландшафтного пространства–времени. Пространственная структура может рассматриваться как индикатор изменчивости функционирования компонентов ландшафта и как условие для процессов, контролирующих их динамику. Статья посвящена выявлению пространственных условий возникновения классов стабильности функционирования фитоценоза на примере зеленой фитомассы, описываемой нормализованным разностным вегетационным индексом (NDVI). Исследование проведено в условиях заповедного низкогорного ландшафта Южного Урала и его пастбищной модификации. Полевые измерения травяной надземной фитомассы подтвердили ее достоверную положительную корреляцию с NDVI. Для анализа временной изменчивости NDVI разработан алгоритм, нивелирующий зависимость зеленой фитомассы от конкретных погодных условий, но учитывающий степень подчинения фации фоновой динамике ландшафтного масштаба. Отклонения от фоновой динамики показателей функционирования трактуются как преобладающее влияние локальных условий. Стабильность динамики фитомассы оценивается по формуле Шеннона по комбинации повторяемостей пяти градаций отклонений от фоновых приращений NDVI между парами сроков внутри вегетационного сезона. Использованы 13 пар сроков съемки Landsat-8. Установлено, что местоположения с наиболее сильными отклонениями от зонального увлажнения в сторону сухости и влажности отличаются повышенной нестабильностью типов динамики фитомассы. Это свидетельствует о том, что вклады процессов локального и ландшафтного масштабов в формирование фитомассы меняются во времени. Нестабильность динамики зеленой фитомассы возрастает в условиях слабого развития почвенного профиля и каменистости. Активные латеральные взаимодействия урочищ плато и гребней при повышенной расчлененности рельефа способствуют стабилизации динамики фитомассы, в то время как в центральных секторах крупных плато стабильность уменьшается. Высокое видовое богатство и повышенная доля мезоксерофитов в фитоценозе способствует стабилизации динамики фитомассы.

Ключевые слова: ландшафт, пространственная структура, NDVI, рельеф, динамика, фитомасса

Введение. Проблема «пространства–времени» в большой степени определяла развитие ландшафтоведения последних десятилетий. Приоритет исследований причин пространственной организации природных комплексов, свойственный 1950–1970-м гг., стал замещаться интересом к факторам устойчивости функционирования. Среди сюжетов, которые привлекали повышенное внимание, можно назвать следующие: развитие морфологических структур [Викторов, 2018]; синхронность/асинхронность функционирования в разных пространственных единицах [Дьяконов, Иванов, 1993; Мамай и др., 2013]; зависимость скоростей ландшафтных процессов от пространственной структуры [Исаченко, 2014; Сысуев, 2020]; диапазоны возможных состояний для разных природных комплексов [Мамай, 2013]; регулирование режима функционирования путем подбора оптимальных пространственных соотношений угодий [Хорошев и др., 2019]; зависимость устойчивости функционирования от внутренней пространственной структуры ландшафтной единицы [Хорошев и др., 2018].

В прикладном отношении перед ландшафтной наукой стоит задача определения допустимых хозяйственных нагрузок и снижения рисков землеполь-

зования на основании оценки степени стабильности естественного функционирования ландшафта. По гипотезе, ее можно предсказывать по характеристикам пространственной структуры ландшафта (набора пространственных пропорций, разнообразия соседств ландшафтных единиц), которая в большой степени зависит от рельефа и контролируемых им потоков влаги. Очевидно, что пространственную структуру охарактеризовать легче, чем получить длительные временные ряды наблюдений. Иначе говоря, она рассматривается как индикатор динамики и как условие для процессов, ее контролирующих. Например, стабильность урожайности сельскохозяйственных культур или гарантированность приемлемого урожая в экстремальные годы может быть предсказана по площадным соотношениям видов урочищ или фаций (западин, ложбин, солонцов и т. п.) в пределах полевого участка [Хорошев и др., 2018].

За последнее десятилетие основным источником косвенной информации о продукции зеленой фитомассы в силу доступности расчетов и возможности обеспечить площадные данные стал нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI).

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: avkh1970@yandex.ru

Обычную тематику исследований на основании индекса можно разделить на следующие категории: 1) динамика растительности и длительные тренды, связанные с изменением климата [Detsch et al., 2016; Тельнова, 2017]; 2) информативность вегетационных индексов и их адекватность для исследований пространственной структуры ландшафта и биопродуктивности [Madonsela et al., 2018; Рулев и др., 2016]; 3) выявление связей растительности с внешними факторами, в т. ч. с почвами [Гопп и др., 2016; Joiner et al., 2019]; 4) мониторинг и прогноз урожая сельскохозяйственных культур [Nagy et al., 2018]; 5) воздействие растительности на поведение животных [Hoagland et al., 2018]. Изменчивость показателей функционирования во времени рассматривается как одно из важнейших оснований для выбора способа землепользования и хозяйственных нагрузок на территорию. Например, классы стабильности урожая использовались для коррекции выбора культуры и севооборота [Blackmore, 2000].

В качестве важнейшего фактора пространственной организации биопродуктивности рассматривается структура рельефа [Gamon et al., 2013; Шарый, Шарая, 2014]. Очевидно, что рельеф влияет на пространственную дифференциацию биопродуктивности через перераспределение тепла и влаги. Однако вопрос о влиянии рельефа и ландшафтной структуры в целом на изменчивость биопродуктивности во времени в литературе освещен слабо.

В предлагаемой статье поставлена цель установить пространственные закономерности обособления классов стабильности фитопродукционного функционирования, обусловленные радиальными и латеральными связями в заповедном низкогорно-степном ландшафте и его пастбищной модификации.

Для этого решались следующие задачи: 1) установить меру адекватности вегетационного индекса NDVI как индикатора зеленой надземной фитомассы в условиях низкогорно-степного ландшафта; 2) выявить пространственные закономерности встречаемости различных типов внутрисезонной динамики фитомассы; 3) проверить гипотезу о зависимости стабильности динамики надземной фитомассы от положения в рельефе, взаимодействий с соседними урочищами и свойств фитоценоза и почв.

Материалы и методы исследований. Исследование проведено в низкогорно-степном ландшафте Южного Урала на участке «Айтуарская степь» государственного заповедника «Оренбургский» (51° с. ш. 57° в. д.).

Ландшафт характеризуется как структурно-эрозионное грядово-балочное низкогорье, сложенное чередующимися пластами песчаников, конгломератов, известняков и алевролитов, с останцами эоценовых поверхностей выравнивания, с петрофитными разнотравно-ковыльно-типчаковыми степями на черноземах южных маломощных сильнокаменистых поверхностно-карбонатных [Хорошев, 2016]. Реликты эоценового этапа развития территории представлены в южной части Айтуарской степи в виде широкого, плоского, местами ступенчатого плато Актобе,

к которому приурочен водораздел рек Алимбет и Айтуарка. Плакорное положение геосистем плато Актобе обуславливает возможность развития нормальных коренных зональных разнотравно-типчаково-ковыльных сообществ на черноземах текстурно-карбонатных. Балки разделены субмеридиональными грядами, возвышающимися над их днищами на разных участках на величину от 10–20 до 100–120 м и в краевой части принимающими вид узких гребней. По мере удаления от параметров коренных плакорных степей и роста литоморфности выстраивается следующий ряд: 1) разнотравно-типчаково-тонконогово-ковыльные, с высоким проективным покрытием прибрежных частей плато и пологих приводораздельных склонов, преимущественно на черноземах текстурно-карбонатных; 2) петрофитно-разнотравно-залесскоковыльно-типчаковые, иногда с повышенным обилием овсеца (*Helictotrichon desertorum*), со средним проективным покрытием вершин гребней и покатых склонов, преимущественно на черноземах; 3) залесскоковыльно-шерстистогрудницево-петрофитно-разнотравно-типчаковые, с низким проективным покрытием крутых склонов, особенно южных экспозиций, с микроосыпями на черноземах или литоземах; 4) инееватопырейно-петрофитно-разнотравные, с низким проективным покрытием очень крутых аструктурных осыпных склонов, с крупными выходами пластов осадочных пород на литоземах; 5) петрофитно-разнотравные, с очень низким проективным покрытием островершинных гребней, с субвертикальными выходами пластов осадочных пород и остаточным накоплением щебня и крутых осыпных склонов на литоземах или элювии коренных пород. При повышенной гидроморфности формируются: 1) кустарниково-богаторазнотравные луговые степи сильноогнутых крутосклонных секторов лощин, прирусловых врезов в днищах балок на черноземах гидрометаморфизованных; 2) кустарниковые (*Spiraea hypericifolia*, *Amygdalus nana*, *Caragana frutex*) луга глубоковрезанных распадков и прирусловых врезов в днищах балок на черноземах гидрометаморфизованных; 3) черноольшанники таволгово-осоково-тростниковые и таволгово-осоково-тростниковые луга расширенных плоскодонных прирусловых врезов балок на черноземах гидрометаморфизованных [Хорошев, 2016].

Для решения поставленных задач проведены: а) расчет вегетационных индексов (NDVI) для 14 весенних и летних безоблачных космических снимков Landsat-8 с разрешением 30 м (14.05.2014, 30.05.2014, 08.06.2014, 17.07.2014, 18.06.2015, 13.07.2015, 29.07.2015, 18.05.2018, 25.05.2018, 29.08.2018, 19.04.2019, 05.05.2019, 06.06.2019, 22.06.2019); б) измерение надземной травяной фитомассы и полевая верификация значений вегетационных индексов NDVI в июне 2019 г.

Ландшафтные описания производились на площадках 10×10 м в фациях репрезентативных для всех звеньев катен и секторов эрозионных форм с разной площадью водосбора. В программу описаний вошли следующие характеристики: принадлежность к

мезоформе рельефа, экспозиция, крутизна, описание формы и характер поверхности, наличие скальных выходов, доля поверхностной каменистости (в %), подстилающие горные породы, свойства почвенных горизонтов (мощность генетических горизонтов, гранулометрический состав, структура, влажность, цветовые характеристики по шкале Манселла, вскипание от HCl 10%), обилие видов трав и кустарников, проективное покрытие и высота ярусов. Общее количество описаний за период 2011–2019 гг. составило 216. В июне 2019 г. были проведены повторные описания на 64 площадках с отбором образцов надземной фитомассы и почв.

Укосы травяной надземной фитомассы на площадках 0,5×0,5 м собирались в полиэтиленовые пакеты, после маршрута сразу же взвешивались в сыром состоянии; после высушивания взвешивались повторно для расчета сухой фитомассы и содержания влаги. Измеренное значение фитомассы в репрезентативной фации было отнесено к соответствующему пикселу космического снимка и цифровой модели рельефа.

Для анализа внутрисезонной изменчивости NDVI разработан специальный алгоритм. Он нивелирует зависимость зеленой фитомассы от погодных условий конкретного года. В то же время алгоритм учитывает степень подчинения надземной фитомассы: а) фоновой динамике ландшафтного масштаба (соответствующей обычным изменениям в степи в течение вегетационного сезона); б) влиянию локальных условий, создающих отклонения динамики фитомассы от ландшафтного фона.

Исходные допущения заключаются в следующем. Под устойчивостью функционирования фации понимается способность сохранять диапазон варьирования и внутрисезонные тенденции вне зависимости от изменчивости внешних сигналов. Изменчивость свойств фации отражает состояние геосистемы более высокого ранга, с одной стороны, и локальные процессы – с другой. Предполагается, что в силу единого для ландшафта климата за период между любыми двумя сроками в течение вегетационного сезона происходит некоторое естественное «фоновое» внутрисезонное приращение индекса (с положительным или отрицательным знаком) в большинстве пикселов. Известно, что в ус-

ловиях дефицитного увлажнения в степной зоне основным регулятором продуктивности является перераспределение влаги по рельефу.

В силу неодинаковости «нормативных» значений для разных видов фаций и несходства условий вегетации в разные годы для обеспечения сравнимости показателей динамики функционирования фаций для каждого из 154 703 пикселов рассчитывались: 1) разность значений NDVI (приращение с положительным или отрицательным знаком) между сроками съемки в течение одного вегетационного сезона (всего 13 пар, табл. 1); 2) среднее (фоновое) приращение NDVI по ландшафту для каждой пары сроков; 3) мера отклонения приращения от среднего значения по ландшафту в единицах стандартного отклонения для каждой пары сроков по каждому пикселу. Затем для каждого пиксела проводились: 1) ранжирование стандартизованных приращений NDVI на пять градаций (см. ниже); 2) расчет повторяемости каждой градации в долях единицы; 3) расчет меры неопределенности динамики NDVI по формуле Шеннона.

Выделены 5 типов внутрисезонной динамики (приращений) NDVI как индикатора зеленой фитомассы: 1) более чем на 1,5 среднеквадратического отклонения (STD) ниже среднего приращения; 2) отклонение на 0,5–1,5 STD ниже среднего; 3) отклонение в пределах фоновой приращения (0,5 STD в обе стороны от среднего); 4) отклонение на 0,5–1,5 STD выше среднего; 5) отклонение более чем на 1,5 STD выше среднего приращения. Было установлено, что для всех пар сроков приращения в пределах 0,5 STD от среднего встречаются наиболее часто (модальные), что и позволяет рассматривать их как фоновые изменения NDVI в масштабе ландшафта. Высокая повторяемость фоновых приращений (3-я градация) трактуется как преобладающий вклад единой для всего ландшафта сезонной динамики погодных условий и низкий вклад локальных условий миграции влаги и, отчасти, минерального питания. Как правило, это наращивание фитомассы от весны к началу календарного лета и ее уменьшение в течение лета; назовем ее стратегией «А». Отклонения от фоновой приращения трактуются как сильное влияние локальных условий, искажающих общую закономерность и снижающих чувствительность к процессам ландшафтного масштаба. Высокая повторяемость первой и второй градаций приращения NDVI означает, что в весенний период происходит максимально быстрое наращивание фитомассы (разница между ранним и поздним сроками отрицательная), а в летний – минимальные ее потери. Данная стратегия («Б») формулируется следующим образом: быстро накопить фитомассу весной и почти сохранить в течение лета. Высокая повторяемость четвертой и пятой градаций приращения NDVI означает, что в весенний период происходит медленное небольшое наращивание фитомассы, а в летний – максимальные ее потери. В этом случае стратегия «В» такова: медленно нарастить фитомассу весной и быстро сократить летом.

Таблица 1

Пары сроков космической съемки Landsat-8, использованные для расчета внутрисезонных приращений NDVI

Год			
2014	2015	2018	2019
Пары сроков (день, месяц)			
14.05–30.05	18.06–17.07	18.05–25.05	19.04–05.05
14.05–08.06	18.06–29.07	18.05–29.08	
30.05–08.06	17.07–29.07	25.05–29.08	
14.05–17.07			
30.05–17.07			
08.06–17.07			

Далее рассчитана повторяемость (вероятность) каждого из пяти типов динамики NDVI по 13 парам сроков. Мера неопределенности (нестабильности) динамики фитомассы оценивалась по формуле Шеннона. Низкие значения неопределенности трактуются как высокая повторяемость одних и тех же градаций приращения фитомассы с вариантами «всегда как большинство» или «всегда вразрез с большинством». Высокая неопределенность трактуется как высокая изменчивость стратегий вследствие непостоянства локальных процессов переноса и накопления влаги по сравнению с динамикой ландшафтного масштаба. Иначе говоря, в этом случае велика зависимость от внутрифациальных и межфациальных взаимодействий, сильно варьирующих в зависимости от условий конкретного года или сезона. Визуализация результатов и расчеты морфометрических показателей рельефа по цифровой модели SRTM (разрешение 30 м после даунскейлинга) проведена в программе SAGA GIS.

Для выявления видов зависимостей изменчивости NDVI от свойств рельефа и почв применялись корреляционный и дисперсионный анализ в программе Statistica 7.0.

Результаты исследований. Измеренные значения надземной фитомассы травяных сообществ после высушивания составили от 5 до 65 ц/га при модальных значениях в интервале 15–25 ц/га (табл. 2). Значения NDVI для периода проведения экспедиции (по снимкам Landsat-8 от 06.06.2019 и 22.06.2019) достоверно коррелируют с влажной зеленой фитомассой с одинаковыми коэффициентами корреляции Спирмена (K) 0,62 и Пирсона – 0,59 (рис. 1). Корреляции с сухой фитомассой ниже, но также достоверны: 0,48 для 06.06.2019 и 0,54 для 22.06.2019. Наиболее жесткая положительная связь существует в интервале значений сухой фитомассы 0–20 ц/га. При больших величинах фитомассы, которые обычно характерны для днищ ложин, значения NDVI менее информативны для оценки надземной фитомассы, что объясняется заметным участием кустарников, не попадающих в укосы.

Анализ локализации участков с разной степенью неопределенности типов внутрисезонной дина-

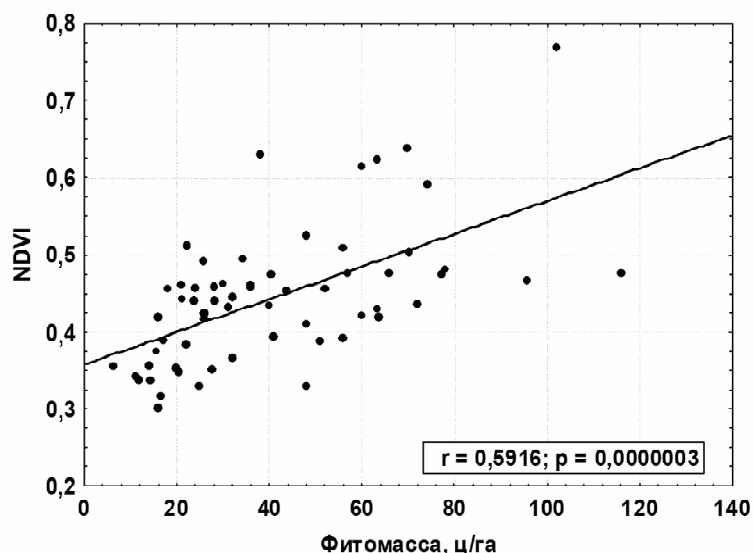


Рис. 1. Соотношение измеренной влажной травяной надземной фитомассы в июне 2019 г. и NDVI по снимку Landsat-8 для пикселей, заключающих фации с измеренным значением фитомассы, дата съемки 06.06.2019 (корреляция Пирсона)

Fig. 1. Relationship between raw herb biomass measured in June, 2019, and the NDVI calculated from Landsat-8 image of 06.06.2019 for the pixels provided with phytomass measurement (Pearson correlation)

мики NDVI позволил выделить ландшафтные условия стабильной и нестабильной динамики зеленой фитомассы.

Высокая стабильность (т. е. низкая неопределенность) типов динамики, как правило, создается высокой повторяемостью фоновой динамики (стратегия «А»), реже – повышенной повторяемостью стратегии «Б» и почти никогда – стратегией «В».

Стабильно фоновые в ландшафтном масштабе внутрисезонные приращения фитомассы (стратегия «А») с наибольшей повторяемостью характерны для урочищ выпуклых вершинных поверхностей – гряд, останцов и плато, реже – для пологих склонов (рис. 2, 3А). Такая стратегия для перечисленных видов урочищ интерпретируется как наиболее частое подчинение локального фитопродуцирования климатическим явлениям ландшафтного масштаба. Очевидно, что именно в таких геоморфологических условиях достигается обычное для степной зоны недостаточное (но не экстремально низкое) увлажнение.

Таблица 2

Описательные статистики значений высушенной надземной фитомассы в июне 2019 г. по видам урочищ, ц/га

Группа урочищ	Средняя сухая фитомасса, ц/га	Кол-во измерений	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Медиана	Верхний квартиль
Гребни	17,1	7	10,7	8,1	34,1	8,2	10,6	28,0
Плато	37,0	4	13,7	17,7	50,0	28,3	40,2	45,7
Склоны	21,0	21	11,1	11,0	64,1	15,4	19,2	22,0
Лощины	21,2	4	21,2	5,1	51,8	7,1	13,9	35,2
Днища балок	29,3	14	8,4	16,8	41,7	22,2	28,0	36,8
Все урочища	24,0	50	12,4	5,1	64,1	15,8	21,3	31,4

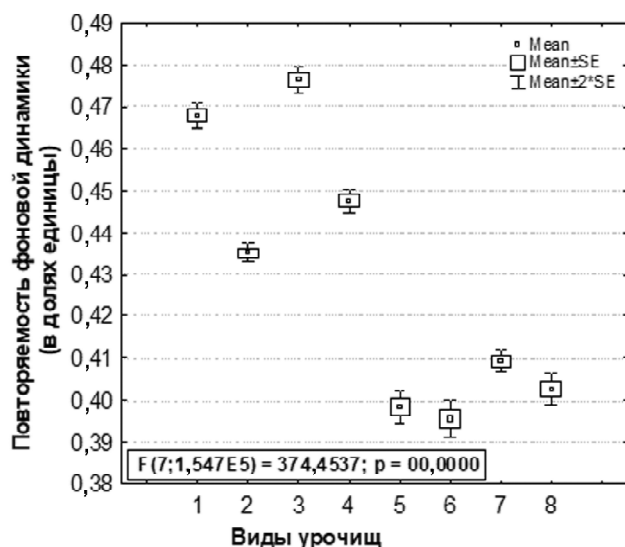


Рис. 2. Повторяемость фоновой внутрисезонной динамики NDVI (отклонение от среднего приращения не более чем на 0,5 STD). Виды урочищ: 1 – плато; 2 – пологонаклонные волнистые поверхности; 3 – выпуклые вершинные поверхности гряд; 4 – пологие склоны; 5 – лощины и узкие балки; 6 – узкие гребни; 7 – днища широких балок; 8 – крутые склоны. Mean – среднее арифметическое повторяемости для вида урочищ; SE – стандартная ошибка среднего значения повторяемости динамики фонового типа по группам урочищ

Fig. 2. Frequency of background intra-seasonal dynamics of NDVI (deviation from the mean increment less than half standard deviation). Land units (urochische) types: 1 – tableland; 2 – gently undulating surfaces; 3 – convex tops of ridges; 4 – gentle slopes; 5 – gullies; 6 – narrow crests; 7 – flat valley bottoms; 8 – steep slopes. Mean – average frequency for a type of urochische; SE – standard error of an average frequency

Повторяемость отклонений от фоновой динамики зеленой фитомассы со стратегией «Б» повышена в урочищах плато, лощин (треть случаев) и особенно пойм ручьев (половина случаев) (см. рис. 3Б). Легко заметить, что это урочища, либо обеспечивающие развитие мощного хорошо дифференцированного профиля черноземов на плакор, подвергавшемся более 30 лет назад распашке, либо с повышенной гидроморфностью. На плато радиальные связи между фитоценозом и хорошо развитой почвой часто «отключают» фитомассу от влияния фоновых процессов ландшафтного масштаба. В лощинах и поймах эту роль выполняет локальный фактор близко залегающих грунтовых вод.

В урочищах плоских днищ широких балок и наложенных на них делювиальных шлейфов, реже – на склонах, повышена повторяемость отклонений от фоновой динамики зеленой фитомассы со стратегией «В» (треть случаев) (см. рис. 3В). Несмотря на ослабленность латерального выноса (как на гребнях и склонах), здесь нет «запаса прочности» в виде мощного развитого чернозема или постоянного притока влаги (как на плато, в лощинах и поймах). Поэтому потеря фитомассы в засушливый летний период происходит с большей скоростью, чем в фоновых условиях. Кроме того, подобная стратегия ярко

проявляется на интенсивно выпасаемых участках, примыкающих к заповеднику.

Обратим внимание, что во всех трех категориях урочищ, различающихся по преобладающим стратегиям приращения фитомассы, с той или иной частотой типы динамики фитомассы все-таки меняются: имеет место большая или меньшая нестабильность динамики зеленой фитомассы.

Наиболее стабильная динамика зеленой фитомассы (минимальная неопределенность) характерна для геохимически автономных урочищ (вершинные поверхности гряд, останцовых повышений) и полого-покатых склонов (см. рис. 3Г). Именно здесь наиболее часто бывают фоновые приращения, а разнообразие возможных градиентов приращения NDVI минимально.

Наибольшая нестабильность типов динамики характерна для лощин и пойм ручьев. В силу резких внутрисезонных и межгодовых контрастов атмосферного увлажнения фитомасса мезофильных и ксеромезофильных сообществ может регулярно попадать в разные градации приращений (при преобладании стратегии «Б»), т. е. «присоединяться» либо к фоновой низкоросло-степной динамике, либо к двум вариантам стратегии «В». Высокая нестабильность свойственна также фитоценозам крутых склонов, узких гребней, в меньшей степени – днищам широких балок с наложенными делювиально-пролювиальными шлейфами.

На основании имеющихся комплексных описаний 216 фаций установлен ряд характеристик компонентов ландшафта, влияющих на стабильность динамики зеленой фитомассы.

Для автономных позиций рельефа (плато, гребни) установлено, что при росте его расчлененности (Terrain ruggedness index, TRI) встречаемость высокой неопределенности/нестабильности типов динамики фитомассы снижается. На гребнях наиболее эффективное влияние оказывает прилегающая территория с радиусом 270 м, на плато – 450 м (табл. 3). Иначе говоря, фитоценозы «чувствуют» стабилизирующие латеральные влияния примыкающих расчлененных склонов – скорее всего, за счет устойчивого оттока грунтовых вод. В центральных частях плато (т. е. при малой расчлененности поверхности) нестабильность динамики может быть высокой.

На гребнях нестабильность динамики фитомассы, а точнее – NDVI, повышается при росте закусаренности (в основном за счет *Spiraea hypericifolia*), что сопровождается снижением pH и ростом содержания подвижного фосфора. Более стабильная динамика фитомассы становится по мере увеличения мощности почв ($K = -0,48$) и фитомассы ($K = -0,81$).

На плато и на склонах достоверных связей меры нестабильности типов динамики фитомассы с химическими и морфологическими свойствами почв и с надземной фитомассой не обнаружено. Однако в центральной части плато Актобе с низкой расчлененностью рельефа и в соседних водосборных понижениях могут быть участки высокой неста-

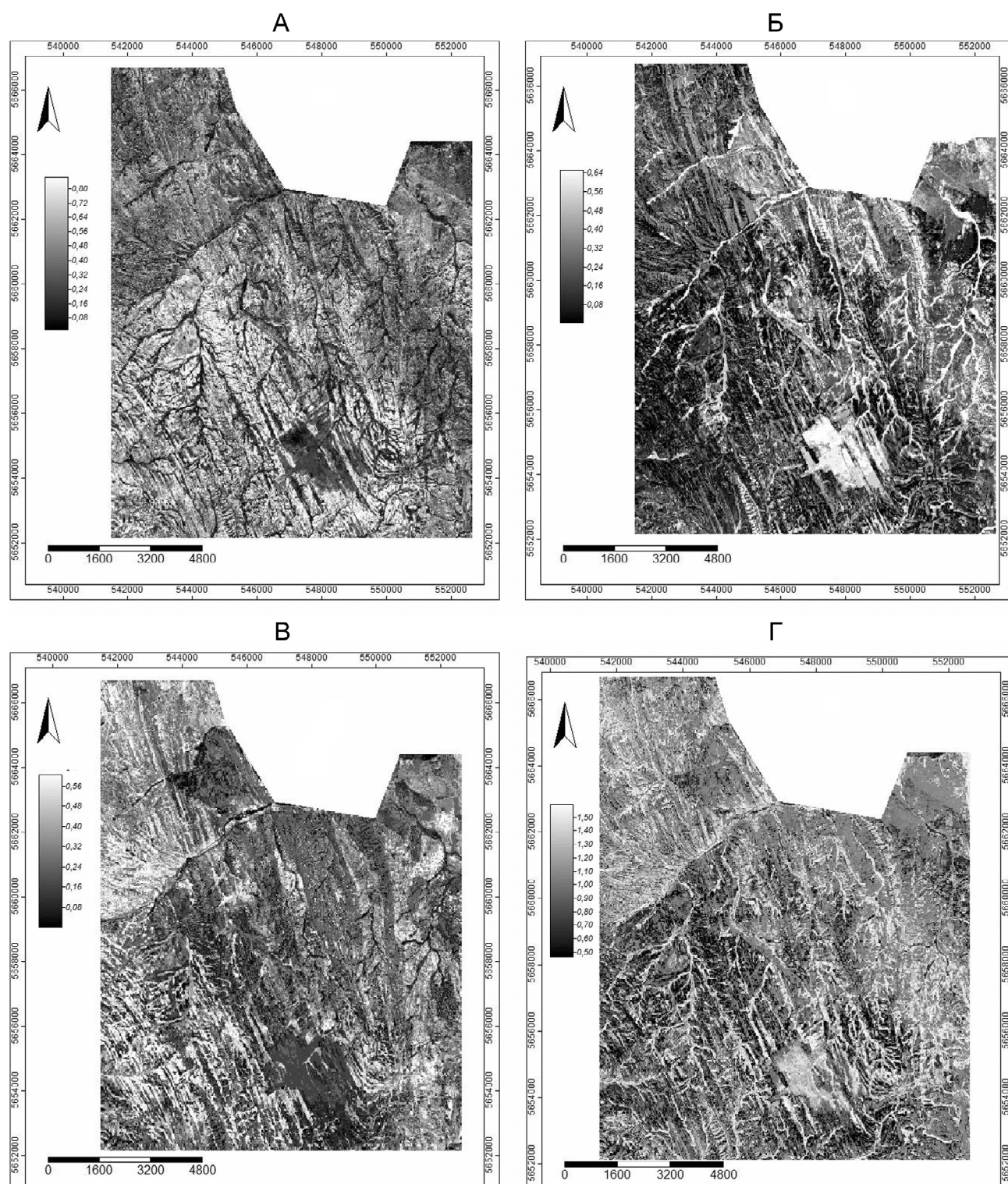


Рис. 3. Повторяемость (в долях единицы) типов внутрисезонной динамики NDVI: А – стратегия «как у большинства» («фоновый» тип динамики, внутрисезонное приращение в пределах 0,5 STD за каждую пару сроков); Б – стратегия «Б» (внутрисезонное приращение менее $-0,5$ STD); В – стратегия «В» (внутрисезонное приращение более $+0,5$ STD); Г – мера неопределенности Шеннона (нестабильности) типов динамики фитомассы

Fig. 3. Frequency of types of intra-seasonal NDVI dynamics: А – strategy "as majority" (background dynamics, within 0,5 standard deviation from the mean increment for each pair of dates); Б – strategy "rapid accumulation of phytomass in spring and preservation in summer" ($\leq -0,5$ standard deviation from the mean increment for each pair of dates); В – strategy "slow accumulation of phytomass in spring and rapid loss in summer" ($> +0,5$ standard deviation from the mean increment for each pair of dates); Г – Shannon uncertainty measure for the types of phytomass dynamics (measure of dynamics instability)

Таблица 3

Коэффициент корреляции Спирмена между индексом расчлененности рельефа (TRI) и мерой неопределенности типов динамики NDVI при $p < 0,05$

Радиус расчета, м	Плато	Гребни	Склоны
90	-0,18	-0,11	0,13
150	-0,22	-0,12	0,14
210	-0,24	-0,12	0,14
270	-0,26	-0,12	0,14
330	-0,27	-0,12	0,14
390	-0,28	-0,11	0,14
450	-0,29	-0,10	0,14

бильности типов динамики фитомассы, что почти всегда сочетается с наличием хорошо развитых мощных черноземов текстурно-карбонатных.

На склонах северной экспозиции динамика NDVI более стабильна по сравнению с южной. Высокая каменистость почв, особенно характерная именно для южных склонов, исключает высокую стабильность типов динамики фитомассы. Нестабильность часто повышается в нижней половине склона по мере увеличения площади водосбора.

В лощинах мера нестабильности типов динамики фитомассы положительно связана с содержанием обменного калия в гумусовом горизонте ($K = 0,51$). При этом калий накапливается при скудном видовом богатстве и наиболее низких значениях фитомассы (менее 24 ц/га).

Для объяснения причин разных типов внутри-сезонной динамики фитомассы проверена также серия гипотез, связанных с видовым богатством и составом фитоценоза. Установлено, что стабильность динамики фитомассы увеличивается при видовом богатстве более 20 видов трав (зафиксированных при июньских наблюдениях), в основном за счет склоновых урочищ ($K = -0,46$). При доле мезоксерофитов по суммарному обилию менее 30% неопределенность типов динамики фитомассы не может быть низкой, а более высокая их доля может создавать условия для высокой стабильности. При доле мезофитов более 15% типы динамики сильно варьируют по годам и сезонам. В урочищах плато и гребней нестабильность типов динамики фитомассы растет при увеличении доли ксерофитов за счет уменьшения повторяемости фоновой динамики. В то же время при возрастании доли мезоксерофитов (*Artemisia marschalliana*, *Centaurea marschalliana*, *Falcaria vulgaris*, *Galium ruthenicum*, *Hieracium virosum*, *Onosma simplicissima*, *Scorzonera austriaca*, *Xanthoselinum alsaticum* и др.) динамика становится более стабильной за счет увеличения повторяемости фоновых приращений фитомассы. В лощинах и балках эта закономерность повторяется, а нестабильность типов динамики растет при возрастании доли мезофитов и ксеромезофитов за счет уменьшения повторяемости фоновых приращений. На склонах за-

висимость динамики фитомассы от структуры фитоценоза почти не выражена.

Обсуждение результатов. Полученные результаты показали, что вегетационные индексы в целом адекватно отражают зеленую надземную фитомассу степных сообществ за исключением урочищ с повышенной гидроморфностью и фитомассой, где при этом велико обилие кустарников, не попадающих в укос травостоя.

Полученные оценки стабильности динамики фитомассы позволяют переходить к определению возможностей ее прогнозирования. Для урочищ с низкой неопределенностью, рассчитанной предложенным способом, фитомасса относительно легко прогнозируется. Высокая неопределенность означает труднопредсказуемую изменчивость факторов формирования фитомассы от срока к сроку. Подобная нестабильность означает непостоянное действие сильных локальных факторов (например, притока склоновых вод или разгрузки грунтовых вод), которые иногда «выводят» территориальную единицу из фонового режима ландшафта с потерей фитомассы от июня к августу. Однако в некоторые сезоны или годы такие локальные факторы оказываются слабыми или не действуют, например из-за экстремального понижения уровня грунтовых вод и прекращения их разгрузки в эрозионных формах; тогда действует фоновая динамика фитомассы.

Виды стратегий с устойчиво сильным отклонением от фоновой динамики фитомассы интерпретируются как устойчивое подчинение фитопродукции процессам локального масштаба. Урочища отрицательных форм рельефа, гребней и крутых склонов характеризуются наиболее высокой неустойчивостью динамики фитомассы с сильным варьированием стратегий от года к году и от сезона к сезону. Это свидетельствует о неустойчивости во времени связей с процессами локального и ландшафтного масштабов в видах урочищ на противоположных концах оси влагообеспеченности.

Прямая зависимость стабильности динамики от видового богатства служит свидетельством в пользу стабилизирующей роли биоразнообразия в продуцировании фитомассы. Чем выше видовое богатство, тем реже фитоценоз отклоняется от присущего ему характера изменения фитомассы в течение сезона. Скорее всего, проявляется взаимокомпенсирующая роль многочисленных видов, которые в зависимости от погодных условий конкретного года берут на себя «бремя» поддержания устойчивого функционирования геосистемы.

Выводы:

– в Айтуарской степи урочища вершинных поверхностей гряд, останцовых возвышений, пологих склонов отличаются повышенной стабильностью динамики зеленой фитомассы. Урочища лощин и пойм, крутых склонов и узких каменистых гребней отличаются сильным варьированием типов динамики от года к году и от сезона к сезону, что свидетельствует о неустойчивости во времени связей с процессами локального и ландшафтного масштабов;

– нестабильность динамики зеленой фитомассы возрастает в условиях слабого развития почвенного профиля, пониженной фитомассы и соответствующих химических свойствах почв (рН, обменный калий, подвижный фосфор): на южных склонах, наиболее каменистых фациях гребней, в сухих секторах лощин;

– активные латеральные взаимодействия урожищ плато и гребней при повышенной расчлененности рельефа способствуют росту стабильности ди-

намики фитомассы, в то время как в центральных секторах крупных плато, в прошлом распахивавшихся, стабильность понижается;

– стабильность динамики фитомассы увеличивается при высоком видовом богатстве фитоценоза, что, возможно, доказывает стабилизирующую роль биоразнообразия в фитопродукционной функции. Повышенная доля мезоксерофитов в фитоценозе способствует увеличению стабильности динамики фитомассы.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00464). Автор выражает благодарность Д.Е. Шаровой, И.В. Волонскому, О.М. Подгорному за участие в сборе и первичной обработке полевых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Викторов А.С. Проблемы моделирования развития морфологических структур // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов. Воронеж: ИСТОКИ, 2018. Т. 1. С. 19–22.

Гопп Н.В., Нечаева Т.В., Савенков О.А., Смирнова Н.В., Смирнов В.В. Оценка влияния мезорельефа склона на пространственную изменчивость свойств почвы и характеристики растительного покрова по данным дистанционного зондирования Земли // Исследования Земли из космоса. 2016. № 3. С. 66–74.

Дьяконов К.Н., Иванов А.Н. Пространственно-временная изменчивость характеристик снежного покрова в ландшафтах Центральной Мещеры // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 1993. № 6. С. 43–51.

Исаченко Г.А. Концепция многолетней динамики ландшафтов и вызовы времени // Вопросы географии. Т. 138. Горизонты ландшафтоведения. М.: Кодекс, 2014. С. 215–232.

Мамай И.И. Закономерности проявления процессов в ландшафтах Мещеры // Ландшафтный сборник «Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении». М.; Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 25–57.

Мамай И.И., Мироненко И.В., Роганов С.Б., Матасов В.М., Глухов А.И., Федин А.В. Синхронность-асинхронность наступления новых состояний в природных территориальных комплексах Мещеры // Ландшафтный сборник «Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении». М.; Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 88–113.

Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. Оценка лесистости агроландшафтов юга Приволжской возвышенности по данным NDVI // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 4(44). С. 32–39.

Сысуев В.В. Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: ЛЕЛАНД, 2020. 600 с.

Тельнова Н.О. Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агроэкосистем лесостепной и степной зон Северной Евразии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 97–107.

Хорошев А.В. Ландшафтная структура Айтуарской степи (заповедник «Оренбургский») и экологические ряды урочищ //

Проблемы географии Урала и сопредельных территорий. Челябинск: Край Ра, 2016. С. 210–216.

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.

Хорошев А.В., Леонова Г.М., Шарова Д.Е. Пространственная устойчивость межкомпонентных связей в степных и лесостепных ландшафтах Южного Урала // Вопросы степеведения. 2019. № 15. С. 337–341.

Шарый П.А., Шарая Л.С. Изменение NDVI лесных экосистем Северного Кавказа как функция рельефа и климата // Лесоведение. 2014. № 5. С. 83–90.

Blackmore S. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, vol. 26, p. 37–51.

Deisch F., Otte I., Appelhaus T., Hemp A., Nauss T. 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.

Gamon J.A., Huemmrich K.F., Stone R.S., Tweedie C.E. Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt. *Remote Sensing of Environment*, 2013, vol. 129, p. 144–153.

Hoagland S.J., Beier P., Lee D. Using MODIS NDVI phenoclasses and phenoclusters to characterize wildlife habitat: Mexican spotted owl as a case study. *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 412, p. 80–93.

Joiner J., Yoshida Y., Anderson M., Holmes T., Hain C., Reichle R., Koster R., Middleton E., Zeng F.-W. Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET) and soil moisture variability on weekly timescales. *Remote Sensing of Environment*, 2018, vol. 219, p. 339–352.

Madonsela S., Cho M.A., Ramoelo A., Mutanga O., Naidoo L. Estimating tree species diversity in the savannah using NDVI and woody canopy cover. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, vol. 66, p. 106–115.

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, vol. 151, p. 41–49.

Поступила в редакцию 24.07.2020

После доработки 16.09.2020

Принята к публикации 06.10.2020

A.V. Khoroshev¹LANDSCAPE CONDITIONS OF STABLE PHYTOPRODUCTION
IN THE AITUAR STEPPE (THE SOUTHERN URALS)

The relationships between the stability of landscape functioning and its spatial pattern are in the focus of contemporary studies of landscape space-time. Spatial pattern may be regarded as a relevant indicator for variable functioning of landscape components as well as a condition for the processes controlling their dynamics. The paper deals with determining spatial conditions for emerging classes of stability for phytocoenoses functioning on the example of green phytomass characterized by the normalized difference vegetation index (NDVI). The study was performed in both strictly protected and grazed sections of the low-mountainous steppe landscape in the Southern Urals. Field measurements of herbal aboveground phytomass confirmed significant positive correlation with NDVI. To analyze temporal variability of NDVI we developed a procedure that neutralizes the dependence of green phytomass on weather conditions of a certain year but considers the degree of concordance of a facies with the background landscape-scale dynamics. The deviations from the background dynamics are considered to indicate the dominant influence of local conditions. The stability of phytomass dynamics was evaluated using the Shannon index for the combination of frequencies of five gradations of NDVI increments between two dates within the vegetation period. We interpreted 13 pairs of Landsat-8 images. It was found that locations with the highest deviations from zonal water supply, both towards dryness and humidity, are very instable in types of phytomass dynamics. This proves that the contributions of local-scale and landscape-scale processes to the phytomass development vary in time. Instability of green phytomass dynamics increases if the soil profile is stony and poorly developed. Active lateral interactions of plateaus and crests within strongly dissected terrains favor the stabilization of phytomass dynamics while within the central parts of large plateaus it is less stable. High species richness and increased share of mesoxerophytes in phytocoenoses also contribute to the stabilization of the phytomass dynamics.

Key words: landscape, spatial pattern, NDVI, relief, dynamics, phytomass

Acknowledgements. The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-05-00464). The contribution of D.E. Sharova, I.V. Volovinsky and O.M. Podgorny to field research and initial data processing is greatly acknowledged.

REFERENCES

- Blackmore S. The interpretation of trends from multiple yield maps, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, vol. 26, p. 37–51.
- Detsch F., Otte I., Appelhans T., Hemp A., Nauss T. 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.
- D'jakonov K.N., Ivanov A.N. Prostranstvenno-vremennaja izmenchivost' harakteristik snezhnogo pokrova v landshaftah Central'noj Meshhery [Spatio-temporal variability of snow cover characteristics in the landscapes of the Central Meshchera]. *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5. Geogr.*, 1993, no. 6, p. 43–51. (In Russian)
- Gamon J.A., Huemmrich K.F., Stone R.S., Tweedie C.E. Spatial and temporal variation in primary productivity (NDVI) of coastal Alaskan tundra: Decreased vegetation growth following earlier snowmelt, *Remote Sensing of Environment*, 2013, vol. 129, p. 144–153.
- Gopp N.V., Nechaeva T.V., Savenkov O.A., Smirnova N.V., Smirnov V.V. Ocenka vlijanija mezorel'efa sklona na prostranstvennuju izmenchivost' svojstv pochvy i harakteristiki rastitel'nogo pokrova po dannym distancionnogo zondirovanija Zemli [Effect of Mesorelief of the Slope on the Spatial Variability of Soil Properties and Vegetation Index According to Remote Sensing Data]. *Issledovanija Zemli iz kosmosa*, 2016, no. 3, p. 66–74. (In Russian)
- Hoagland S.J., Beier P., Lee D. Using MODIS NDVI phenoclasses and phenoclusters to characterize wildlife habitat: Mexican spotted owl as a case study, *Forest Ecology and Management*, 2018, vol. 412, p. 80–93.
- Isachenko G.A. [The concept of long-term dynamics of landscape and challenges of the time], *Voprosy geografii* [Problems of geography], vol. 138. *Gorizonty landshaftovedenija* [Horizons of landscape science], Moscow, Kodeks Publ., 2014, p. 215–232. (In Russian)
- Joiner J., Yoshida Y., Anderson M., Holmes T., Hain C., Reichle R., Koster R., Middleton E., Zeng F.-W. Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales, *Remote Sensing of Environment*, 2018, vol. 219, p. 339–352.
- Khoroshev A.V., Leonova G.M., Sharova D.E. Prostranstvennaja ustojchivost' mezhkomponentnyh svjazej v stepnyh i lesostepnyh landshaftah Juzhnogo Urala [Spatial stability of intercomponent relationships in steppe and forest-steppe landscapes of the Southern Urals], *Voprosy steppevedenija*, 2019, no. 15, p. 337–341. (In Russian)
- Khoroshev A.V., Tkach K.A., Murtazina D.U. Vlijanie landshaftnoj struktury na urozhajnost' zernovyh kul'tur v stepnoj zone Kazahstana [Influence of landscape pattern on productivity of grain crops in the steppe zone of Northern Kazakhstan], *Vestn. Mosk. Un-ta. Ser. 5. Geogr.*, 2018, no. 3, p. 62–69. (In Russian)
- Khoroshev A.V. [Landscape structure of Aituar steppe ("Orenburgsky nature reserve") and ecological series of urochisches], *Problemy geografii Urala i sopredel'nyh territorij* [Problems of

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: avkh1970@yandex.ru

geography of the Urals and adjacent territories], Cheljabinsk, Kraj Ra Publ., 2016, p. 210–216. (In Russian)

Madonsela S., Cho M.A., Ramoelo A., Mutanga O., Naidoo L. Estimating tree species diversity in the savannah using NDVI and woody canopy cover, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, vol. 66, p. 106–115.

Mamaj I.I. [Regularities of processes realization in the Meschera landscapes], *Landshaftnyj sbornik (Razvitie idej N.A. Solnceva v sovremennom landshaftovedenii)* [Landscape collection (Development of N.A. Solntsev's ideas in contemporary landscape science)], Moscow, Smolensk, Ojkumena Publ., 2013, p. 25–57. (In Russian)

Mamaj I.I., Mironenko I.V., Roganov S.B., Matasov V.M., Gluhov A.I., Fedin A.V. [Synchronism/asynchronism of emergence of new states in natural territorial complexes of the Central Meschera], *Landshaftnyj sbornik (Razvitie idej N.A. Solnceva v sovremennom landshaftovedenii)* [Landscape collection (Development of N.A. Solntsev's ideas in contemporary landscape science)], Moscow, Smolensk, Ojkumena Publ., 2013, p. 88–113. (In Russian)

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, vol. 151, p. 41–49.

Rulev A.S., Kosheleva O.Ju., Shinkarenko S.S. Ocenka lesistosti agrolandshaftov juga Privolzhskoj vozvyshechnosti po dannym NDVI [Assessment of woodiness in agrolandscapes of the

Southern Volga Upland according to NDVI]. *Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2016, no. 4(44), p. 32–39. (In Russian)

Sharyj P.A., Sharaja L.S. Izmenenie NDVI lesnyh ekosistem severnogo Kavkaza kak funkciya rel'efa i klimata [Changes of NDVI in forest ecosystems of the North Caucasus as a function of relief and climate]. *Lesovedenie*, 2014, no. 5, p. 83–90. (In Russian)

Sysuev V.V. *Vvedenie v fiziko-matematicheskuyu teoriju geosystem* [Introduction to physical-mathematical theory of geosystems], Moscow, LELAND Publ., 2020, 600 p. (In Russian)

Tel'nova N.O. Vyjavlenie i kartografirovanie mnogoletnih trendov NDVI dlja ocenki vklada izmenenij klimata v dinamiku biologicheskoy produktivnosti agroekosistem lesostepnoj i stepnoj zon Severnoj Evrazii [Revealing and mapping long-term NDVI trends for the analysis of climate change contribution to agroecosystems' productivity dynamics in the Northern Eurasia forest-steppe and steppe], *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, vol. 14, no. 6, p. 97–107. (In Russian)

Viktorov A.S. [Problems of modelling the development of morphological patterns], *Sovremennoe landshaftno-ekologicheskoe sostojanie i problemy optimizacii prirodnoj sredy regionov* [Current landscape-ecological state and problems of optimization of the natural environment of the regions], Voronezh, ISTOKI Publ., 2018, vol. 1, p. 19–22. (In Russian)

Received 24.07.2020

Revised 16.09.2020

Accepted 06.10.2020