ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

УДК 911.52(470.11)

А.В. Хорошев[1], К.А. Мерекалова[2]

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ МЕЖКОМПОНЕНТНЫХ СВЯЗЕЙ В СРЕДНЕТАЕЖНОМ ЛАНДШАФТЕ

Цель исследования – проверить гипотезу о нестационарности (изменчивости состава плеяд коррелирующих свойств, тесноты связей и вида зависимости) межкомпонентных связей внутри ландшафтной единицы и о возможности ее внутренней дифференциации под влиянием рамочных условий геосистем более высокого ранга. Применено сравнение качества мультирегрессионных и корреляционных моделей в четырех вариантах: а) для центрального и периферийных секторов единого урочища; б) для серии выборок в секторах единого урочища, отличающихся по характеру соседствующих пространственных единиц; в) для двух типов фаций внутри местности; г) для выборок уровня ландшафта и отдельных местностей. Задача решалась на примере двух участков с разными степенями ландшафтного разнообразия в пределах структурно-эрозионно-моренной равнины в Устьянском районе Архангельской области. Состав корреляционных плеяд свойств компонентов варьирует внутри ландшафта, что свидетельствует о нестационарности межкомпонентных связей. Фациальная дифференциация внутри урочища может контролироваться соседством с другими урочищами. Сохранение во внутренних секторах междуречья внутрифитоценотических отношений и частичное разрушение почвенно-фитоценотических свидетельствует о росте вклада саморазвития фитоценоза независимо от свойств морфолитогенной основы в условиях ослабленной дренированности. Снижение разнообразия ландшафтоформирующих факторов при переходе на более низкий иерархический уровень вызывает изменение состава корреляционных плеяд свойств и тесноты связей.

Ключевые слова: ландшафт, связь, корреляция, нестационарность, иерархия

Введение. В ландшафтоведении и ландшафтной экологии давно отмечено, что характер связей между компонентами ландшафта различаются на разных иерархических уровнях [Крауклис, 1979]. Традиционная иерархическая модель подразумевает, что каждый процесс действует на определенном уровне пространственной организации. В последнее десятилетие получил развитие альтернативный «градиентный» подход. В нем считается, что процессы действуют в некотором диапазоне иерархических уровней и взаимодействуют друг с другом; на каждое свойство влияют процессы многих иерархических уровней [McGarigal, Cushman, 2005; Cushman, Huetmann, 2010]. Первый шаг полимасштабного градиентного моделирования включает измерение переменных-предикторов и переменных-откликов в сети многочисленных одинаковых по размеру и примыкающих друг к другу операционных единиц. На втором шаге строится полимасштабная модель фактор-отклик. На третьем шаге модель используется для экстраполяции в пространстве и во времени. Градиентная модель позволяет проследить, как меняются в пространстве типы отношений между переменными, установить резкие и постепенные границы смены свойств или смены отношений между свойствами. Фактически эта же идея используется в ландшафтоведении [Хорошев, Алещенко, 2005], в цифровом почвенном картографировании [Цифровая …, 2012]. Основной единицей становится «пиксел», а не монотонное «пятно» (patch), состоящее из множества похожих или отличающихся друг от друга пикселов. Пикселы могут отличаться друг от друга не только по набору экологических условий местообитания, но и по свойствам «влиятельных соседей», то есть по характеристикам окрестностей.

Градиентный подход противопоставляется традиционному матричному подходу ландшафтной экологии и, в некоторой степени – генетико-морфологическому подходу ландшафтоведения. В матричной модели не рассматривается локальное варьирование внутри пятна и матрицы (matrix); они принимаются как однородные [Forman, 2006]. Однако в реальности внутри матрицы есть варьирование и она в разной степени и по-разному на разных участках оказывает влияние на пятно. В ландшафтоведении обычно считается, что каждая единица внутренне неоднородна, кроме элементарной, хотя в последние годы понятие элементарности усложняется. Однородность по генезису, как и те процессы, в результате которых сформировался элементарный объект исследования (фация, например), не являются гаран-

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

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра физической географии и ландшафтоведения, мл. науч. с.; *e-mail*: merekalova@yandex.ru

тией одинаковой интенсивности ландшафтоформирующих процессов в пределах фации [Дьяконов, Линник, 2017]. Взаимодействие пространственной единицы с соседними и удаленными единицами требует учета позиционных факторов. Если урочище выделено, например, по признаку однородного плоского рельефа и единого генезиса отложений, то его внутренняя мозаичность может формироваться как варьированием гранулометрического состава и собственной динамикой фитоценоза, так и неодинаковым влиянием соседних урочищ в зависимости от положения по отношению к границе.

Выделена проблема перехода от точечных данных об интенсивности процесса к континуальному представлению структуры ландшафта [Линник, 2008; Etherington, Perry, 2012]. Предложено разрабатывать методы, которые позволили бы выявлять смены типов межкомпонентных связей в пространстве [Крауклис, Евдокимова, 1975; Lookingbill, Urban, 2004; Хорошев, Алещенко, 2005]. Если исследователь имеет в распоряжении набор описаний относительно равномерно распределенных в пространстве и имеет возможность соотнести каждое из описаний с пикселами цифровой модели рельефа или космоснимка, то можно проследить реакцию свойств компонентов ландшафта на постепенно меняющиеся свойства вмещающей геосистемы. Часто мы имеем дело с нестационарностью межкомпонентных отношений: их характер меняется от места к месту. Приходится определять, на каком участке пространства чувствительность свойства к абиотическому градиенту больше, на каком – меньше, меняется ли набор взаимодействующих элементов и вид зависимости.

Предмет нашего исследования – устойчивость связей в пространстве, которая почти не изучалась в ландшафтоведении. Под устойчивостью в пространстве мы понимаем неизменность состава плеяд коррелирующих свойств, близость показателей тесноты связей и вида зависимости на разных участках ландшафта. Однотипность связей позволяет считать мозаичную территорию организованной по единому правилу, картографировать ее как единую геосистему, прогнозировать в ее пределах изменения во времени на основании принципа эргодичности. Рассматриваются ландшафтные связи двух разновидностей: внутриуровенные и межуровневые. Под внутриуровенными связями подразумеваются зависимости между свойствами компонентов для территории, принадлежащей геосистеме того или иного иерархического ранга (например, связи почв и фитоценозов, рассчитанные на выборке фаций внутри урочища). Под межуровневыми связями понимаются зависимости свойств единиц низшего ранга от рамочных условий, накладываемых единицей более высокого ранга (например, свойств урочища от свойств местности) и наоборот. Связь оценивается на статистически достоверной выборке пространственных единиц, объединяемых типологической (тип фаций) или позиционной (расстояние до ландшафтной границы) принадлежностью.

Цель исследования – проверить гипотезу об устойчивости межкомпонентных связей внутри ландшафтной единицы и о возможности ее внутренней дифференциации под влиянием рамочных условий со стороны геосистем более высокого ранга. Основная задача – установить степень сходства/различия тесноты и вида связей: а) для центрального и периферийных секторов единого урочища; б) для серии выборок в секторах единого урочища, отличающихся по характеру соседствующих пространственных единиц; в) для двух типов фаций внутри местности; г) для выборок уровня ландшафта и отдельных местностей.

Материалы и методы. Задача об устойчивости внутриуровенных и межуровневых межкомпонентных связей в пространстве решалась на примере двух участков с разными степенями ландшафтного разнообразия в пределах структурно-эрозионно-моренной равнины в Устьянском районе Архангельской области (рис. 1). Первый участок «Козловка» включает плоскую водораздельную поверхность и пологий приводораздельный склон с елово-березово-сосновыми чернично-зеленомошными лесами на агродерново-подзолистых и торфянисто-подзолистых почвах на междуречье рек Стругницы и Козловки площадью 0,787 км^2. Исследование обеспечено равномерной сеткой из 99 комплексных ландшафтных описаний, расположенных друг от друга на среднем расстоянии 100 м. 51 фация описана в урочище плоской поверхности междуречья на расстоянии до 169 м от бровки, 48 фаций – на пологом приводораздельном склоне на расстоянии до 120 м от бровки. Почвенно-фитоценотические связи внутри участка были описаны нами ранее [Хорошев с соавт., 2008; Хорошев, 2016]. На новом этапе мы исследуем варьирование вида и тесноты связей внутри участка. Данные с участка «Козловка» использованы для получения серии выборок пространственных единиц, объединяемых территориальным единством. Мультирегрессионные модели связей в плеяде пересчитывались для разных групп описаний, отличавшихся по позиции в пределах урочища: а) по удаленности от бровки склона, б) по ширине сектора водораздельной поверхности, в) по вертикальной расчлененности в группе соседствующих урочищ, выраженной через стандартное отклонение высот в скользящем квадрате с линейными размерами от 3- до 11-кратных размерам пикселов.

Участок «Медвежий» отличается от предыдущего более крупными размерами (10 км^2), ступенчатым строением междуречья и более высокой степенью заболоченности [Хорошев с соавт., 2013]. Он расположен в пределах двух местностей структурно-эрозионно-моренного ландшафта – «дренированной» и «недренированной». Первая представляет собой относительно расчлененную, структурно-эрозионную холмисто-увалистую равнину с относительно мощным чехлом песчано-супесчаных отложений, подстилаемых суглинками, с господством сосняков можжевельниковых чернично-брусничных зеленомошных на агродерново-подзолистых почвах. Вто-

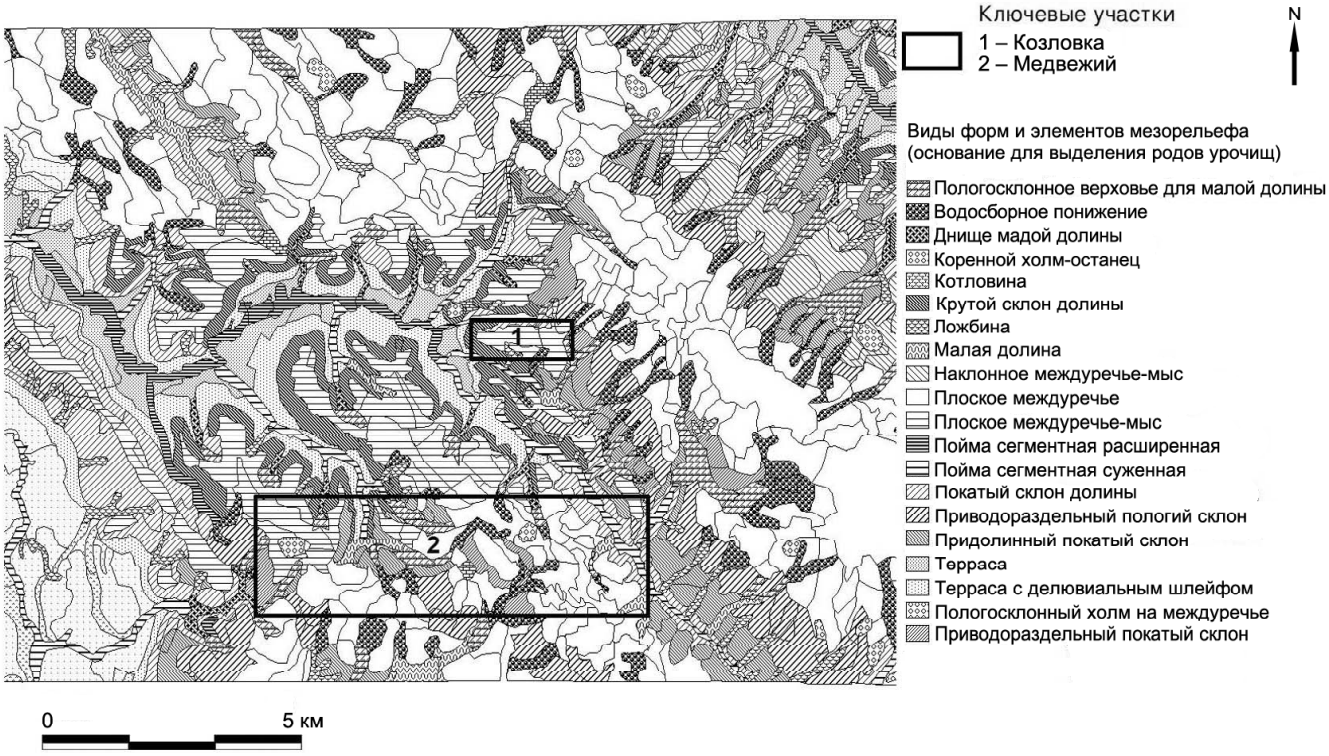

Рис. 1. Урочища средней части бассейна р. Заячья и расположение ключевых участков

Fig. 1. Urochishhes of the middle part of the Zayachia River basin and the location of key sites

рая местность представлена слаборасчлененной плохо дренированной структурно-моренной равниной, образованной по поверхностям неотектонических микроблоков, с маломощным песчано-супесчаным чехлом, подстилаемым суглинками, с березово-сосново-еловыми, преимущественно долгомошными, лесами на торфянисто-подзолистых почвах в сочетании с березово-сосновыми осоково-сфагновыми переходными болотами на торфяниках. Данные с участка «Медвежий» использованы для получения серии выборок в геосистемах разных иерархических рангов и типов. Всего здесь использовано 89 описаний, каждое из которых репрезентативно для урочища или подурочища, а не фации, как на участке «Козловка». На первом шаге анализировалась выборка для уровня ландшафта, включающая точки полевых описаний из обеих местностей (рис. 2). На втором шаге массив разделен на две выборки (уровень местностей), для которых выявлены вариации состава плеяд и тесноты связей между свойствами. На третьем шаге сравнивались модели межкомпонентных связей раздельно для лесных и болотных фаций недренированной местности.

Методом многомерного шкалирования проведено снижение размерности исходных полевых описаний. Этот метод позволяет оперировать не индивидуальными свойствами, а совокупностями коррелирующих свойств. Для каждого яруса фитоценоза, для характеристик строения почв, цвета почв, гранулометрического состава отложений выделены латентные переменные-оси, каждая из которых характеризует положение фации на градиенте от одного из экологических факторов (трофности, влажности, сукцессии и др.). Для участка «Козловка» выделено 19 осей дифференциации ярусов фитоценоза (5 осей дифференциации травостоя, 5 – древостоя, 4 – кустарников, 2 – кустарничков, 3 – мхов), 4 – мощностей генетических горизонтов почв, 4 – цветовых характеристик почв, 4 – гранулометрического состава почв. Для участка «Медвежий» выделено 26 осей дифференциации ярусов фитоценоза (8 – травостоя, 6 – древостоя, 6 – кустарников, 4 – кустарничков, 2 – мхов), 4 – мощностей генетических горизонтов почв, 6 – цветовых характеристик почв, 4 – гранулометрического состава почв. Положение фации на оси отражает соотношение признаков с противоположной реакцией на экологический фактор: например, соотношение гигрофитов и мезофитов как мера влажности местообитания. Путем построения матрицы непараметрических корреляций Спирмена между парами осей, методом главных компонент и кластерного анализа установлены плеяды взаимосвязанных (сопряженно меняющихся в пространстве) свойств. Для основных плеяд путем постановки каждой переменной на место зависимой и перерасчета коэффициента детерминации выбрано наилучшее линейное мультирегрессионное уравнение и уравнение второй степени регрессии поверхности отклика (Response surface regression) с максимальным коэффициентом детерминации.

Результаты. Для участка «Козловка» первая плеяда взаимосвязанных свойств отражает сопряженную реакцию кустарничков, кустарников, трав и строения почвенных горизонтов на богатство ми-

Рис. 2. Схема ландшафтной структуры участка «Медвежий» и принцип формирования выборок

Fig. 2. Scheme of the landscape structure of the Medvezhij key site and the principle of sampling

нерального питания. Наивысшее качество модели (коэффициент детерминации (КД) в уравнении регрессии поверхности отклика R^2=0,56, в линейном мультирегрессионном уравнении – 0,45) достигается при использовании в качестве зависимой переменной первой по значимости оси дифференциации кустарничков, которая отражает противоположную реакцию на минеральное питание бореальных и неморальных видов. Для модели установлено, что ошибки мультирегрессионной модели (разность между наблюдаемыми и предсказанными значениями) в сторону завышения предсказанных значений возрастают при минимальной вертикальной расчлененности окрестностей в квадрате со стороной 90 м (рис. 3). Этот результат доказывает ослабление связей в плеяде во внутреннем плоском секторе междуречья по сравнению с периферийным сектором и приводораздельными частями склонов.

Оказалось, что теснота связи, вид зависимости в плеяде и набор значимых независимых переменных зависят от положения группы фаций по отношению к бровке склона (табл. 1). На плоском междуречье и в прибровочной позиции (не более 40 м по горизонтали ниже бровки) соотношение видов в ярусах фитоценоза является реакцией на сохранность признаков пахотных режимов довоенного времени в почвах. В частности, на старопахотных агродерново-подзолистых почвах практически отсутствует кустарничковый ярус, из кустарников отсутствуют шиповник и можжевельник, но всегда повышено обилие малины и смородины по сравнению с фитоценозами на зональных подзолистых и торфянисто-подзолистых почвах. Однако в приводораздельной части склонов почвенно-фитоценотические связи ослабевают, что свидетельствует о росте разнообразия комбинаций свойств вследствие роста разнообразия факторов. Во внутренней части междуречья (более 60 м от бровки) почвенно-фитоценотические связи становятся недостоверными. В то же время сохраняются чисто фитоценотические отношения (прежде всего, между кустарниками и кустарничками). Наиболее высокое качество модели связей в плеяде достигается во внутреннем секторе междуречья (на расстоянии более 90 м от бровки). При сходном собственном рельефе фаций варьирование обилий кустарников, кустарничков и мхов контролируется вертикальной расчлененностью в квадратной окрестности со стороной 330 м. В прибровочной части плоской водораздельной поверхности достоверных зависимостей от вертикальной расчлененности вышестоящей геосистемы не выявлено.

Обнаружена зависимость состава плеяд от строения почвообразующей толщи. На двучленных отложениях (песчано-супесчаный плащ мощностью 25–40 см, подстилаемый тяжелыми суглинками) существуют достоверные связи между свойствами кустарников, кустарничков, мхов, трав и мощностью почвенных горизонтов, чувствительных к трофнос-

ти. На песках и супесях достоверными сохраняются связи только между кустарниками, кустарничками и мхами, причем с меньшей теснотой, чем на двучленных отложениях. Проверка гипотезы о значимости межурочищных взаимодействий для межфациального варьирования внутри водораздельной поверхности показала следующее. Наиболее тесные связи в плеяде, охватывающие все ярусы фитоценоза и почву, достигаются в наиболее широком восточном секторе междуречья с минимальной расчлененностью (табл. 2).

При этом по сравнению с узкими секторами, соседствующими с крутыми склонами, повышенная вариабельность обилий кустарников и мхов отражает варьирование набора и мощностей почвенных горизонтов. Вид зависимости (знаки при параметрах уравнения) выдерживаются во всех трех секторах независимо от характера соседства.

Вторая плеяда связывает свойства кустарникового, древесного и травяного ярусов со степенью оподзоленности/гумусированности почв. В ней теснота связей также зависит от положения по отношению к бровке склона (табл. 1). Однако, в отличие от первой плеяды, более тесные связи наблюдаются в приводораздельной части пологого склона и ослабевают по мере продвижения вглубь плоской водораздельной поверхности. КД линейного мультирегрессионного уравнения достигают максимума (0,83 в выборке из 69 наблюдений) на склоне и в прибровочной полосе. Внутри плоской водораздельной поверхности наблюдается слабая сопряженность варьирования свойств почв и фитоценоза.

Для ключевого участка «Медвежий» выделены две корреляционные плеяды свойств компонентов ландшафта. Первая плеяда включает свойства растительного покрова, чувствительные, в основном, к трофности местообитания (соотношение мега-, мезо- и олиготрофных видов деревьев, кустарников, кустарничков и трав). Во вторую плеяду вошли свойства компонентов ландшафта, чувствительные к влажности – соотношение ксерофитных, мезофитных и болотных видов растительного покрова, торфяных и подзолистых почв.

Разделение массива данных на две локализованных в пространстве выборки («дренированная» и «недренированная» местности) привело к значительному увеличению как количества взаимосвязанных свойств компонентов ландшафта (с 15 до 28–30), так и количества парных корреляционных связей между ними (с 17 до 25–45). Для дренированной местности теснота связей с другими свойствами компонентов увеличилась для боровых видов кустарников и кустарничков (можжевельник, вереск, брусника и др.) (КД до 0,87), а также для соотношения зеленых мхов и лишайников (индикаторы сухих и свежих гигротопов) со сфагнумом (сырые и мокрые гигротопы) в моховом покрове (КД 0,59). В дренированной местности, по сравнению с выборками недренированной местности и всего ландшафта, стала достоверной и сильной (КД 0,52–0,8) взаимосвязь строения почвенного профиля (набор и мощность горизонтов) с совокупностью ярусов фитоценоза. Последние представлены осями дифференциации: а) древостоя, отделяющими сосну от ели с осиной (фактор трофности) и сосну с подростом ели от березы с подростом сосны (различие боров и болот – фактор влажности); б) несколькими осями дифференциации травостоя, связанными с фактором влажности; в) осью дифференциации кустарничкового яруса, разделяющей вереск с голубикой и костянику (фактор трофности), и осью, разделяющей чернику, с одной стороны, и вереск, морошку – с другой (то есть противопоставляющей бореальные местообитания всем остальным); 4) осью дифференциации мохового яруса, разделяющей зеленые мхи и лишайники со сфагнумом (фактор влажности). В недренированной местности две плеяды выделяются гораздо более четко. При этом теснота связей свойств компонентов, чувствительных к влажности, здесь больше (КД 0,5–0,65), чем в дренированной местности (КД на 0,15–0,2 меньше). Свойства растительности, чувствительные к трофности, в основном, также сильнее взаимосвязаны по сравнению с дренированной местностью. В целом, для этой местности характерны более сильные взаимосвязи между свойствами ярусов фитоценоза

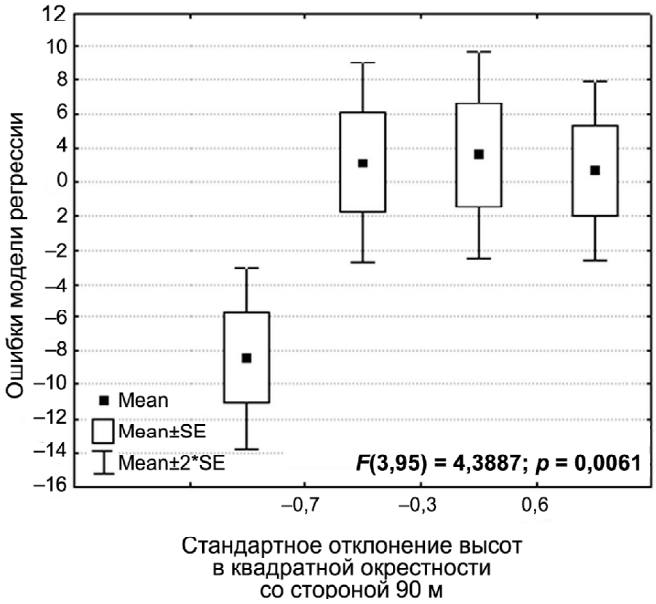

Рис. 3. Зависимость ошибок модели регрессии поверхности отклика для первой оси дифференциации кустарничков (участок «Козловка») от вертикальной расчлененности рельефа в квадратной окрестности со стороной 90 м. Уравнение отражает связь обилия кустарничков с обилием кустарников, трав, мхов и мощностью почвенных горизонтов в зависимости от трофности. Mean – среднее, SE – стандартная ошибка

Fig. 3. Dependence of the errors of regression model of the response surface for the first differentiation axis of low shrubs (the Kozlovka key site) on the roughness of relief within the adjacent squares of 90 m sides. The equation reflects the relation of low shrubs abundance and that of bushes, herbs and mosses and the depth of soil horizons depending on the nutrient status. SE is for standard error

Таблица 1

Качество мультирегрессионного уравнения первой степени (участок «Козловка») в зависимости от расстояния до бровки

Расстояние до бровки, м	Количество точек описания в выборке	Доля объясненной дисперсии, % (в скобках – уровень значимости *p*-level)	
		плеяда 1	плеяда 2
90–…	13	67 (0,04)	71 (0,02)
60–…	27	43 (0,01)	62 (0,0001)
30–…	42	39 (0,0007)	56 (0,000002)
0–…	50	41 (0,00006)	61 (0,000000)
–30–…	70	44 (0,00000)	60 (0,000000)
–60–…	80	45 (0,00000)	56 (0,000000)
–90–…	88	46 (0,00000)	54 (0,000000)
–120–…	99 (весь массив)	45 (0,00000)	57 (0,000000)
4 непересекающиеся выборки			
–120…–45	24	14 (0,55)	83 (0,0000)
–44…–1	24	22 (0,30)	60 (0,0011)
0…59	24	48 (0,009)	66 (0,0002)
60…169	27	44 (0,01)	62 (0,0001)
4 пересекающиеся выборки			
–120…30	69	35 (0,00001)	66 (0,0000)
–89…60	67	33 (0,00004)	54 (0,0000)
–59…90	67	40 (0,000002)	53 (0,0000)
–39…169	70	43 (0,000000)	60 (0,0000)

Примечание. Плеяда 1: зависимая переменная – первая ось дифференциации кустарничков; независимые переменные – оси дифференциации кустарников, трав, мхов, мощностей почвенных горизонтов, чувствительные к трофности. Плеяда 2: зависимая переменная – первая ось дифференциации деревьев; независимые переменные – оси дифференциации кустарников, трав, мощностей почвенных горизонтов, вторая ось дифференциации деревьев, чувствительные к гумусированности/оподзоленности почв.

Таблица 2

Качество мультирегрессионного уравнения первой степени в зависимости от ширины плоской водораздельной поверхности (участок «Козловка»)

Долготный сектор	Средняя ширина водораздельной поверхности	Количество точек описания в выборке	Доля объясненной дисперсии, %	Уровень значимости (*p*-level)
Для четырех секторов				
1	100	25	43	0,02
2	250	23	47	0,016
3	400	25	41	0,02
4	1000	26	65	0,0001
Для трех секторов				
1	200	34	49	0,0005
2	300	33	25	0,07
3	400	32	78	0,0000

Примечание. Зависимая переменная – первая ось дифференциации кустарничков. Независимые переменные – оси дифференциации кустарников, трав, мхов, мощностей почвенных горизонтов, чувствительные к трофности.

(кроме обилия боровых видов). Однако при этом свойства почвенного профиля практически независимы от фитоценоза, в отличие от дренированной местности.

Для определения особенностей изменения пространственной структуры межкомпонентных связей внутри сложных урочищ были проанализированы раздельно лесные и болотные фации в пределах плоских междуречий недренированной местности. В результате выявлено, что при меньшем количестве достоверно взаимосвязанных свойств компонентов ландшафта в пределах всего междуречья (21 против 30 для лесных фаций), количество парных связей в обоих случаях сопоставимо (43 и 45 соответственно). Для болотных фаций оба показателя больше почти в два раза: 38 (из 40) взаимосвязанных осей дифференциации и 72 сильных (более 0,5) парных корреляций. Для лесных фаций выделяются две корреляционные плеяды взаимосвязанных свойств растительности, чувствительных к влажности (7 переменных) и трофности (15 переменных). Для болотных фаций и междуречья в целом такие плеяды не выявляются, так как многие свойства растительности и почв имеют достоверные связи с большим количеством переменных. В результате КД для наборов взаимосвязанных свойств (19 переменных для всего урочища и 23 – для болотных фаций) также больше почти для всех свойств ландшафтных компонентов при анализе всего междуречья, а для болот достигают 0,95–0,99. Таким образом, жестко детерминированные межкомпонентные отношения внутри болотных фаций вносят значительный вклад в результаты анализа связей для уровня вмещающих единиц, в данном случае – для уровня сложного урочища. При этом позиционный фактор дифференциации плоской поверхности незначим: распределение заболоченных и суходольных фаций внутри междуречья не объясняется расстоянием до бровок водораздельной поверхности (рис. 4), а подчиняется структуре небольших линеаментов, связанных с блоковой тектоникой.

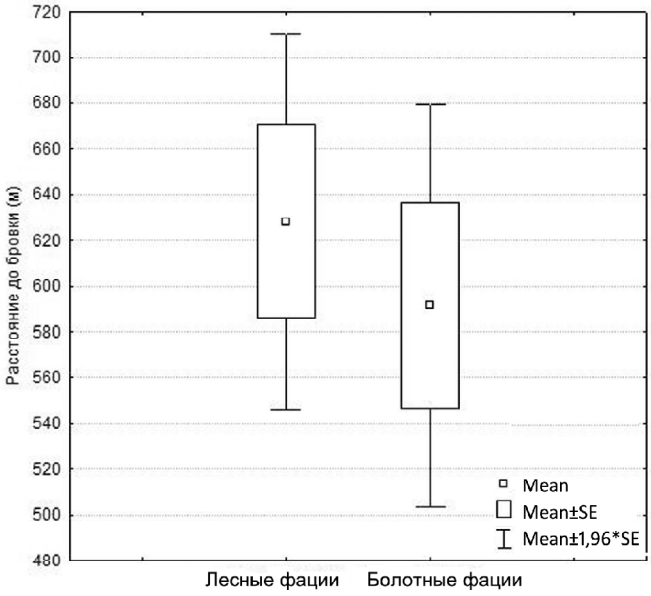

Рис. 4. Отсутствие значимых различий в расположении лесных и болотных фаций (участок «Медвежий») относительно бровки водораздельной поверхности (F=0,35; p=0,55)

Fig. 4. Absence of significantly different positions of forest and bog facies (the Medvezhij key site) in relation to the interfluve edge (F=0,35; p=0,55)

Обсуждение результатов. Исследование показало, что каждая местность характеризуется специфическим набором парциальных геосистем и тесностью связей в плеядах. Кроме того, на вид межкомпонентных зависимостей и тесноту связей могут оказывать влияние геометрические свойства урочища и набор примыкающих соседних урочищ, иначе говоря – рамочные условия со стороны геосистемы более высокого ранга. Следовательно, прогноз потенциальных цепных реакций в ландшафте при внешнем воздействии может варьировать в зависимости не только от собственных свойств урочища, но и от свойств вышестоящих геосистем.

Сравнение корреляционных плеяд в дренированной и недренированной местности, в периферийном и центральном секторах плоского водораздельного урочища показало, что по мере ослабления дренажа сокращается значимость фактора трофности и растет значимость фактора влажности в межкомпонентных отношениях и в пространственной дифференциации. Одновременно фитоценоз становится более замкнутой саморазвивающейся системой, отчасти «отрывается» от почв. При этом необходима «поправка» на строение почвообразующей толщи. Так, двучленные отложения (при подстилании супесей суглинками на глубине 10–50 см) способствуют усилению зависимости фитоценоза от почв по сравнению с почвами, целиком формирующимися в мощных супесчаных или песчаных отложениях. Это объясняется тем, что на двучленных отложениях микромасштабное (фациальное) варьирование фактора трофности может контролировать состав ярусов фитоценоза в зависимости от глубины залегания суглинка.

Внутри водораздельного урочища под действием фактора соседства происходит обособление ландшафтных единиц более низкого ранга. Высокое качество модели связей в плеяде во внутреннем секторе междуречья свидетельствует о наличии закономерной мозаичности, наличии обособленных ландшафтных единиц низкого иерархического уровня. При одинаковом собственном рельефе фаций наличие рамочных условий со стороны геосистемы более высокого ранга доказывается зависимостью обилия кустарничков и мхов от рельефа окрестностей со стороной 90 м. Из этого следует, что геоморфологически и литологически однородное «урочище» на самом деле дифференцировано в зависимости от ландшафтного соседства: чем более глубоко расчленена окрестность, тем больше сказывается повышенное минеральное питание, тем меньше развит зональный кустарничково-моховый ярус из черники, брусники, политрихума и сфагну-

ма. Это позволяет выделить внутри урочища единицы более низкого ранга, образующие закономерный факторально-динамический ряд (в данном случае по степени выраженности фактора трофности); при этом знание о локальных отклонениях от основного вида зависимости дает возможность отделить сектора урочища, где его действие маскируется иными факторами и вид зависимости меняется или зависимость ослабевает (рис. 5). Напротив, в периферийной части урочища водораздельной поверхности локальные фациальные взаимодействия более значимы, чем рамочные условия вышестоящей геосистемы. Состояние ярусов кустарников, кустарничков и мхов склоновых фитоценозов не только определяются собственными свойствами фаций, но и отражают латеральное перераспределение влаги и элементов минерального питания между плоской водораздельной поверхностью, нижележащим крутым склоном долин и днищем долин, что доказывается их зависимостью от рельефа окрестностей, как и во внутренней части междуречья.

Повышенная взаимоадаптированность компонентов в центральном секторе установлена только для внутрифитоценотических связей, частично контролируемых рамочными условиями со стороны геосистемы более высокого ранга. Для внутренней части плоской водораздельной поверхности характерна мозаичность, порождаемая в основном внутрифитоценотическими взаимодействиями, отчасти контролируемыми вариациями мощности песчано-супесчаного плаща, а также степенью расчлененности – набором соседних урочищ. Под влиянием латеральных связей с соседними пространственными единицами внутри урочища плоской водораздельной поверхности обособляются единицы более низкого иерархического уровня. В прибровочной части водораздельной поверхности проявляется внутриурочищная дифференциация почв и фитоценозов, связанная с контрастностью условий выноса и накопления элементов минерального питания. На пологом приводораздельном склоне, граничащем с крутыми склонами долин, наблюдается большое разнообразие комбинаций свойств ярусов фитоценоза (ослабление взаимной детерминированности ярусов) при относительно чуткой реакции на соотношение гумусированности и оподзоленности почв.

Пространственная устойчивость структуры межкомпонентных связей (состав плеяд взаимосвязанных свойств) проявляется при изменении масштабного уровня анализа в случае сохранения разнообразия факторов дифференциации. Тогда структура корреляционных плеяд сохраняется при переходе от ландшафтного иерархического уровня к уровню отдельной местности. В нашем случае это означает, что в недренированной местности состав плеяд воспроизводит таковой для ландшафта в целом, поскольку фактор трофности на обоих иерархических уровнях является значимым наряду с фактором влажности. В отличие от этого, в дренированной местности значимость фактора трофности снижается, что приводит к уменьшению литоэдафического разнообразия, а фактор влажности становится ведущим. В этом случае (уменьшения разнообразия при переходе на более низкий иерархический уровень) состав плеяд и связи в ней меняются, и не приходится говорить о пространственной устойчивости межкомпонентных связей.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости модернизации подходов к ландшафтному картографированию с целью более адекватного отражения латеральных влияний между соседствующими природными комплексами, в том числе занимающими более низкие гипсометрические позиции. Это может достигаться применением более гибких способов показа границ с отражением ширины полосы постепенных переходов, вероятности принадлежности к соседним классам, неопределенности классификационной принадлежности. Варьирование тесноты межкомпонентных связей внутри урочища требует включения позиционного фактора в число причин возможного неодинакового хода цепных реакций при внешнем воздействии. Кроме того, данные о неодинаковой тесноте связей могут использоваться для обоснования степени дробности картографирования: чем более жесткие связи между компонентами (то есть разнообразие комбинаций ограниченное), тем, как правило, более дробная ландшафтная структура. Речь идет не об отказе от традиционного геолого-геоморфологического подхода к выделению ландшафтных единиц, а о более системном его применении с учетом разномасштабных латеральных взаимодействий. Последовательная проверка гипотез о размерах значимой окрестности позволяет увеличить достоверность индентификации геосистем с внутренними латеральными взаимодействиями. Некоторое ослабление почвенно-фитоценотических связей (в отличие от внутрифитоценотических) на слабодренированных территориях заставляет с осторожностью подходить к возможностям фитоиндикации свойств почв в подобных условиях, в частности – при определении типов леса в лесном хозяйстве, планировании мелиораций.

Выводы:

– состав корреляционных плеяд свойств компонентов существенно варьирует внутри ландшафта, что свидетельствует о существенной нестационарности межкомпонентных связей;

– фациальная дифференциация внутри геоморфологически и литологически однородного урочища может контролироваться соседством с другими урочищами, что требует учета позиционного фактора при ландшафтном картографировании;

– сохранение во внутренних секторах междуречья внутрифитоценотических отношений и частичное разрушение почвенно-фитоценотических свидетельствует о росте вклада саморазвития фитоценоза независимо от свойств морфолитогенной основы в условиях ослабленной дренированности, что накладывает ограничения на возможности фитоиндикации почв;

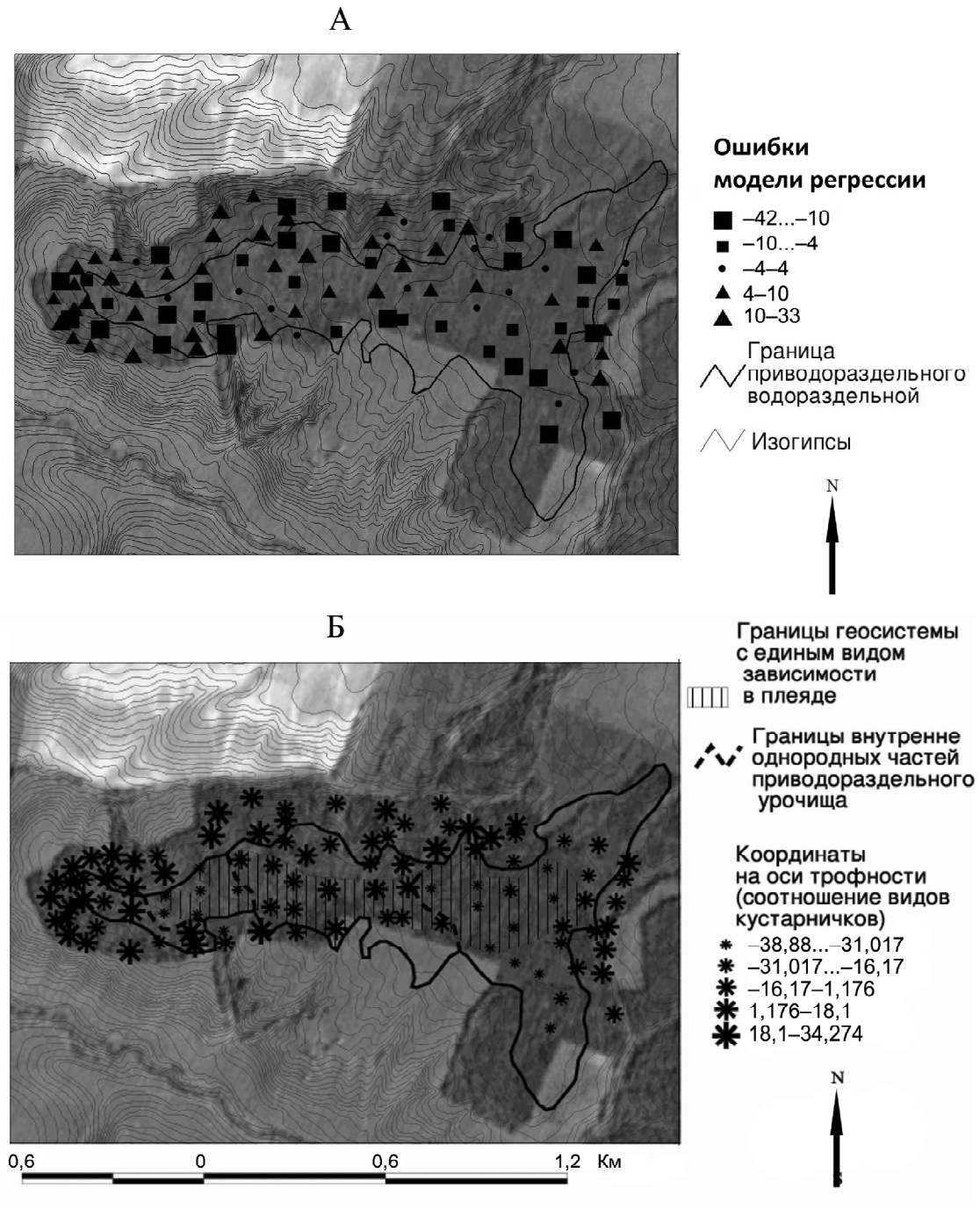

Рис. 5. Внутренняя дифференциация приводораздельного урочища (участок «Козловка»). Обозначения: А – ошибки модели регрессии, связывающей в единую плеяду свойства кустарничков, кустарников, трав, мхов, мощностей почвенных горизонтов, чувствительные к трофности. Малые значки соответствуют фациям, подчиняющимся единому виду зависимости; Б – соотношение видов кустарничков как индикатор внутренней дифференциации урочища – координаты на оси трофности. Малые значки соответствуют высокому обилию типичных бореальных кустарничков черники и брусники, крупные значки – их отсутствию или малому обилию при повышенном обилии костяники. Заштрихована часть урочища с устойчивым в пространстве видом взаимозависимости свойств, с мозаичной внутренней структурой, но при едином ведущем факторе дифференциации свойств, входящих в плеяду

Fig 5. Inner differentiation of the near-watershed urochishhe (the Kozlovka key site). Legend: A – errors of regression model linking the nutrient status-dependent properties of low shrubs, bushes, herbs and mosses and the depths of soil horizons. Small symbols correspond to facies having a uniform type of dependence; B – ratio of low shrub species as an indicator of inner differentiation of the urochishhe – coordinates on the nutrient status axis. Small symbols correspond to high abundance of typical boreal low shrubs, i.e. bilberry and cowberry; large symbols are for their absence or small abundance at the increased abundance of stone bramble. The shaded part of the urochishhe has a spatially stable type of properties interdependence, the mosaic internal structure, but a uniform leading factor of differentiation of properties of the correlation group

– устойчивость межкомпонентных связей в пространстве зависит от иерархического уровня геосистем; снижение разнообразия ландшафтоформирующих факторов при переходе на более низкий иерархический уровень вызывает изменение состава корреляционных плеяд свойств и тесноты связей.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00447).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дьяконов К.Н., Линник В.Г. Некоторые проблемы науки о ландшафте XXI века // Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: мат-лы XII межд. ландшафтной конф. Тюмень: Изд-во Тюменского гос. ун-та, 2017. Т. 1. С. 19–24.

Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.

Крауклис А.А., Евдокимова В.Н. Опыт количественного описания натурной модели // Природные режимы и топогеосистем Приангарской тайги. Новосибирск: Наука, 1975. С. 246–269.

Линник В.Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели. Автореф. дис. … докт. геогр. н. М., 2008. 40 с.

Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.

Хорошев А.В., Алещенко Г.М. Пространственная дифференциация типов межкомпонентных отношений в ландшафте // Научные чтения, посвященные 100-летию со дня рождения академика В.Б. Сочавы. Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2005. С. 42–46.

Хорошев А.В., Артемова О.А., Матасов В.М., Кощеева А.С. Иерархические уровни взаимосвязей между рельефом, почвами и растительностью в среднетаежном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2008. № 1. С. 66–72.

Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования / Гл. ред. А.Л. Иванов. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. 350 с.

Cushman S.A., Huettmann F. (Eds.) Spatial Complexity, Informatics, and Wildlife Conservation. Springer, Tokyo Berlin Heidelberg New York, 2010. 458 p.

Etherington T.R., Perry G.L.W. Using point process intensity to establish the spatio-temporal grain of continuous landscape tessellations and graphs // Landscape Ecology. 2012. V. 27. P. 1083–1090.

Forman R.T.T. Land Mosaics. Cambridge University Press, 2006. 632 p.

Lookingbill T., Urban D. An empirical approach towards improved spatial estimates of soil moisture for vegetation analysis // Landscape Ecology. 2004. V. 19. № 4. P. 417–433.

McGarigal K., Cushman S.A. The gradient concept of landscape structure / Eds.: J. Wiens, M. Moss. Issues and perspectives in landscape ecology. Cambridge University Press, Cambridge, 2005. P. 112–119.

Поступила в редакцию 22.02.2018
Принята к публикации 06.12.2018
После доработки 16.01.2019

A.V. Khoroshev[1], K.A. Merekalova[2]

SPATIAL STATIONARITY OF INTERCOMPONENT RELATIONSHIPS IN A MIDDLE-TAIGA LANDSCAPE

The research aims to test a hypothesis about nonstationarity of intercomponent relationships within a landscape unit, namely the composition of correlation groups, linkage density and the type of interdependency. We hypothesize also that inner differentiation of a landscape unit is possible within the framework conditions imposed by higher-order geosystems. We compare the quality of multiregression and correlation models for: a) central and peripheral sectors of a single unit; b) data sets of the sectors of a unit having different neighboring units; c) two types of facies within a locality; d) data sets of landscape and locality levels. Case study was performed in the Ustyansky district of the Arkhangelsk region, in the middle taiga landscape with structural relief shaped by glacial and erosion processes. The composition of correlation groups of landscape properties varies within the landscape thus evidencing the non-stationary nature of intercomponent relationships. Facial differentiation within urochishche could be conferred by neighboring urochishches. The interior sections of interfluve areas preserve the linkages among vegetation

[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

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Physical Geography and Landscape Science, Junior Research Scientist; *e-mail*: merekalova@yandex.ru

layers in comparison with partly destroyed soil-vegetation relationships. This could be explained by the higher input of phytocoenosis self-development under poor drainage conditions regardless the properties of the morpholithogenous basis. Decreasing diversity of landscape-forming drivers at the lower hierarchical level results in the changes of correlation groups and linkage density.

Key words: landscape, linkage, correlation, nonstationarity, hierarchy

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 17-05-00447).

REFERENCES

Cifrovaja pochvennaja kartografija: teoreticheskie i jeksperimental'nye issledovanija [Digital soil mapping: theoretical and experimental studies] / Gl. red. A.L. Ivanov. Pochvennyj institut imeni V.V. Dokuchaeva, Moscow, 2012. 350 p. (In Russian)

Cushman S.A., Huettmann F. (Eds.) Spatial Complexity, Informatics, and Wildlife Conservation. Springer, Tokyo Berlin Heidelberg New York, 2010. 458 p.

D'jakonov K.N., Linnik V.G. Nekotorye problemy nauki o landshafte XXI veka [Challenges for the landscape science in the 21st century] // Landshaftovedenie: teorija, metody, landshaftno-jekologicheskoe obespechenie prirodopol'zovanija i ustojchivogo razvitija: mat-ly XII Mezhd. landshaftnoj konferencii. Izd-vo Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta, Tjumen, 2017. V. 1. P. 19–24. (In Russian)

Etherington T.R., Perry G.L.W. Using point process intensity to establish the spatio-temporal grain of continuous landscape rastitel'nost'ju v srednetaezhnom landshafte [Hierarchical levels of interrelationships between relief, soil and vegetation in a middle-taiga landscape] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5, geografija. 2008. № 1. P. 66–72. (In Russian)

Forman R.T.T. Land Mosaics. Cambridge University Press, 2006. 632 p.

Khoroshev A.V. Polimasshtabnaja organizacija geograficheskogo landshafta [Multiscale organization of a geographical landscape]. Moscow: Tovarishhestvo nauchnyh izdanij KMK, 2016. 416 p. (In Russian)

Khoroshev A.V., Aleshhenko G.M. Prostranstvennaja differenciacija tipov mezhkomponentnyh otnoshenij v landshafte [Spatial differentiation of intercomponent linkages types in a landscape] // Nauchnye chtenija, posvjashhjonnye 100-letiju so dnja rozhdenija akademika V.B. Sochavy. In-t geografii SO RAN, Irkutsk, 2005. P. 42–46. (In Russian)

Khoroshev A.V., Artemova O.A., Matasov V.M., Koshheeva A.S. Ierarhicheskie urovni vzaimosvjazej mezhdu rel'efom, pochvami i rastitel'nost'ju v srednetaezhnom landshafte [Hierarchical levels of interrelationships between relief, soil and vegetation in a middle-taiga landscape] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5, Geografija. 2008. № 1. P. 66–72. (In Russian)

Krauklis A.A. Problemy jeksperimental'nogo landshaftovedenija [Problems of the experimental landscape science]. Novosibirsk: Nauka, 1979. 232 p. (In Russian)

Krauklis A.A., Evdokimova V.N. Opyt kolichestvennogo opisanija naturnoj modeli [Experience of quantitative description of a large-scale model] // Prirodnye rezhimy i topogeosistem Priangarskoj tajgi. Novosibirsk: Nauka, 1975. P. 246–269. (In Russian)

Linnik V.G. Landshaftnaja differenciacija tehnogennyh radionuklidov: geoinformacionnye sistemy i modeli [Landscape differentiation of technogenic radionuclides: geoinformation systems and models]. Avtoref. dis. … dokt. geogr. n. Moscow, 2008. 40 p. (In Russian)

Lookingbill T., Urban D. An empirical approach towards improved spatial estimates of soil moisture for vegetation analysis // Landscape Ecology. 2004. V. 19. № 4. P. 417–433.

McGarigal K., Cushman S.A. The gradient concept of landscape structure / Eds.: J. Wiens, M. Moss. Issues and perspectives in landscape ecology. Cambridge University Press, Cambridge, 2005. P. 112–119.

Received 22.02.2018
Accepted 06.12.2018
Revised 16.01.2019