

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ЛАНДШАФТНЫХ ГРАНИЦ

© 2022 г. А.В. Хорошев

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
географический факультет, Москва, Россия
e-mail: avkh1970@yandex.ru*

Дается исторический обзор представлений о дискретности и континуальности ландшафтной сферы и влияния на них концепций характерного времени, факторально-динамических рядов, обратных связей между геокомпонентами. Выделены перспективные направления исследований ландшафтных границ в нескольких аспектах: как продукта выбора масштаба исследования; как условия развития синергетических процессов; как результата смены видов межкомпонентных связей; как индикаторов динамики пространственной структуры; как следствия смены режимов функционирования. Описан функционально-динамический подход к выделению ландшафтных границ, который опирается на использование временного ряда данных для определения диапазона и повторяемости возможных состояний геосистемы. На примере заповедного ландшафта «Айтуарская степь» на Южном Урале обоснована применимость метода анализа «горячих пятен» для разграничения природных комплексов с разной пространственно-временной организацией фитопродукционного процесса. Временной ряд вегетационных индексов NDVI использован для картографирования повторяемости пятен повышенной фитомассы и выделения пульсирующих границ между степными и луговыми урочищами. Диапазон колебаний показателей функционирования в ходе многолетней и сезонной динамики служит полезным индикатором для локализации границ на картах, оценки их устойчивости во времени, определения ширины переходных полос.

Ключевые слова: геосистема, динамика, функционирование, NDVI, фитомасса, анализ «горячих пятен», степь, луг, Южный Урал.

DOI: 10.5922/1994-5280-2022-3-6

Введение и постановка проблемы. Вопрос о причинах возникновения границ между геосистемами как природными территориальными комплексами разных рангов с самых ранних этапов и до сих пор был в центре внимания ландшафтоведения [5; 14]. Главной (и желательной, в глазах многих исследователей) закономерностью организации ландшафтной сферы долгое время считалась дискретность. С одной стороны, это было связано с общей философской методологической установкой в советский период на необходимость выявления объективной реальности, применительно к физической географии – к выявлению объективно существующих природных территориальных единиц. Методология ландшафтоведения развивалась под влиянием целевой функции картографирования, направленной на территориальную привязку планировочных решений. Фактически «геотопологический детерминизм» (по выражению А.Н. Ласточкина [8]) во многом определяет мышление ландшафтоведов: если правильно выявить геолого-геоморфологические границы, то «почти

все» становится известно про главные черты естественного почвенно-растительного покрова. Спустя более чем полвека после разработки концепции морфологической структуры, был сформулирован принцип гравитационного подчинения Н.А. Солнцева: в территориальной организации наземных геосистем эволюционно мобильные природные компоненты и факторы, обладающие сравнительно малыми характерными временами, подчиняются консервативным компонентам и факторам, которые отличаются более длительными характерными временами развития [10]. Физическая интерпретация принципа гравитационного подчинения, по В.Н. Солнцеву [12], состоит в следующем: ведущая роль морфолитогенной основы в пространственной дифференциации обусловлена энергией покоя – консервативной гравитационной энергией противодействия деятельным потокам (водным, воздушным, биотическим), индуцируемым преобразованиями электромагнитной энергии – нагреванием, охлаждением, замерзанием оттаиванием тел, продуцированием биомассы

и мортмассы, миграциями живых организмов с целью пополнения запасов энергии, перемещением семян воздушными потоками и животными и др.

Проявлением континуальности ландшафта как гетерогенного образования часто является постепенное изменение пространственных соотношений морфологических частей вдоль какого-либо градиента физических полей в факторально-динамическом ряду. Наибольшие градиенты изменения характеристик разных компонентов, как правило, не совпадают, что считается специфическим свойством ландшафтного экотона. Причинами континуальной организации ландшафтной сферы могут быть постепенность в пространстве нарастания мощности рыхлых отложений или соотношения гранулометрических фракций, уровня грунтовых вод, частоты затопления или подтопления и др. Постепенность перехода между природными комплексами часто реализуется в неполной взаимной адаптированности геокомпонентов и может быть связана с незавершенностью процесса трансформации одного природного комплекса в другой, экспансии наиболее конкурентоспособных фитоценозов при инерции почвенного покрова. В настоящее время континуальность и дискретность ландшафтной сферы считаются взаимодополняющими явлениями. Радикальная концепция повсеместной континуальности, фактически не допускающая разграничения территориальных единиц и пространственной привязки хозяйственных решений, трансформировалась в представление о наличии ядер типичности природных комплексов и ландшафтных экотонных, совмещающих черты соседних комплексов.

Цель этой статьи – на основе современного развития представлений о дискретности и континуальности ландшафтной сферы границах обосновать целесообразность применения функционально-динамических критериев для распознавания ландшафтных границ.

Обзор ранее выполненных исследований и современное развитие представления о ландшафтных границах. К 1970-м годам стало ясно, что различия характерного времени компонентов [2] накладывают ограничения на принцип всеобщей взаимосвязанности взаимообусловленности

свойств компонентов, который в ландшафтоведении исходил из геотопологического детерминизма. Взаимодействовать могут только процессы с близкими характерными временными и пространственными масштабами. Стационарные исследования 1960–1980-х гг. внесли существенные коррективы в представление о геотопологическом детерминизме и дискретности ландшафтной сферы [6]. Важнейшую роль сыграли разработка концепции серийных состояний [15] и факторально-динамических рядов [7]. По мере эволюции геосистемы при смене серийных состояний меняется не только набор свойств, но и теснота межкомпонентных связей. Основная причина, как правило, заключается в стремлении биотических компонентов достичь максимальной автономности от свойств абиотической среды и создать наиболее замкнутый биологический круговорот. Поэтому важнейшей составляющей методологии исследования межкомпонентных отношений стало требование обеспечивать сопоставимость стадий развития пространственных единиц, включаемых в анализ связей. Геосистемы в факторально-динамическом ряду подчиняются единому фактору, но различаются по свойствам в соответствии с мощностью этого фактора. Организующий фактор необязательно строго подчиняется морфолитогенной основе либо постепенно меняет свою мощность в пространстве. Таким образом, возникает необходимость в идентификации мозаичных геосистем с единым видом межкомпонентной зависимости [23].

В настоящее время формирование сильной положительной обратной связи между геокомпонентами рассматривается как основной механизм формирования дискретности при однообразной морфолитогенной основе [11]. В результате автокатализа происходит удаление от исходного состояния в ареале действия такой связи, часто с формированием специфических сингенетических образований (торф, солевые или железистые новообразования в почвах и др.) и возможностью экспансии за счет соседних геосистем. При этом возможно возникновение и устойчивое сосуществование нескольких различных состояний геосистемы при исходно одинаковых условиях среды; такие геосистемы называли триггерными [1].

Относительная условность противопоставления дискретности и континуальности объясняется как многообразием комбинаций ландшафтообразующих факторов, так и зависимостью от масштаба исследования и практических задач, решаемых для ландшафтных единиц. В общем случае дискретность или континуальность связана с градиентом потенциалов физических силовых полей, прежде всего – гравитационного и инсоляционного [16]. На участках быстрого возрастания градиента в пространстве формируются резкие дискретные границы между геосистемами, соответствующие конвергентным или дивергентным границам потоков вещества.

В последние десятилетия в исследованиях проблемы соотношения дискретности и континуальности прослеживается ряд новых аспектов, которые ранее были на периферии внимания или вообще не исследовались.

Границы как продукт выбора масштаба исследования. В случаях континуальной пространственной организации ландшафта способ проведения границ между его частями определяется масштабом и задачами исследования. В зависимости от масштаба экотон может рассматриваться либо как относительно широкая переходная полоса, либо как линейная граница. В зависимости от масштаба границы могут быть показаны в виде условной линии, переходной полосы или постепенного изменения пропорции морфологических частей. Несогласованность компонентных границ объясняется полимасштабностью ландшафтных процессов и несовпадением характерных времен компонентов. Если на предполагаемой морфологией ландшафта границе меняются не все свойства сразу, то это не означает, что ландшафтной единицы нет. Это означает, что одновременно в одном пространстве наложены друг на друга парциальные геосистемы (состоящие из группы свойств), которые подчиняются процессам разного масштаба, у них могут быть резкие или постепенные границы [18]. Задача сводится к выявлению соответствий между масштабом процессов и масштабом дифференциации групп свойств. На этом основании можно устанавливать иерархию ландшафтных единиц и информативные свойства для каждого ранга единиц [20].

Границы как условие развития синергетических эффектов. М.Д. Гродзинский

[4] различает континуальные, синергетичные и стрийальные (полосчатые) экотоны. В синергетичных экотонах формируются свойства, нехарактерные для смежных природных комплексов. Поэтому, по современным представлениям, экотоны могут занимать площадь сопоставимую с ядрами геосистем и представлять собой самостоятельные ландшафтные объекты со специфическими закономерностями структуры, функционирования, динамики [3]. Наиболее широкие экотоны формируются при малых градиентах физических полей. Формирование экотона может быть результатом нелинейного отклика геокомпонентов на постепенные изменения свойств среды с проявлением эффекта порогового (критического) значения или кумулятивного эффекта внешнего воздействия. Контрастность условий среды может способствовать аккумуляции вещества латеральных потоков или накоплению сингенетических образований (например, железистых новообразований на окислительном барьере в почвах на границе лесного и болотного урочищ). Экотон может отличаться, по сравнению с ядрами типичности, повышенными внутренней мозаичностью, биоразнообразием. В силу синергетических свойств при ландшафтном планировании часть экотонов приобретает повышенную экологическую ценность и включается в экологический каркас (например, вдоль границ водных объектов, вдоль бровок и подножий склонов [22]).

Границы как результат смены видов межкомпонентных связей. Вид зависимостей может варьировать в пространстве. Могут быть установлены точные диапазоны ландшафтных условий, при которых группы свойств компонентов связаны по тому или иному правилу. Тогда выделяются мозаичные территориальные системы – геохоры с единым типом межкомпонентных отношений [23]. В такой геохоре действует единый системообразующий процесс (например, движение грунтовых вод, рассеяние семян или поток вещества из пород в почвы), но с разной силой проявления в разных пространственных элементах, т.е. существует факторально-динамический ряд. При воздействии на один компонент (или его свойство) другие компоненты, входящие в корреляционную плеяду, будут меняться сходным образом. Ее внутренняя мозаичность может

рассматриваться как модель разных временных стадий процесса (например, роста уровня грунтовых вод). Именно идентификация геохор такого рода создает возможность применения эргодического подхода для прогнозирования изменений ландшафта во времени. Постепенное ослабление действия системообразующего фактора от ядра к границе приводит к тому, что по одним свойствам природный комплекс похож на ядро, а по другим – начинает напоминать смежный комплекс. Допустим, доказано, что в некоторой части пространства существуют такие контрасты морфолитогенных условий, что свойства мобильных и лабильных геокомпонентов (почвы, растительности, вод) заключены в непересекающихся диапазонах (т.е. принадлежат ядрам типичности). Тогда за пределами ядер можно методом дискриминантного анализа по совокупности признаков для каждого конкретного участка, обеспеченного многомерными данными, рассчитать вероятность принадлежности к обоим «соседям» [17; 20].

Границы как индикатор динамики пространственной структуры. Традиционно на ландшафтных картах границы показывают статичными, что уже не может считаться адекватным реальности и требованиям практики. Наиболее хорошо известна подвижность границ урочищ эрозионного, селевого, обвально-осыпного, криогенного происхождения, которые могут менять свое положение в считанные годы или даже за более короткие промежутки времени. Не отражать динамичность таких границ, направление и скорости их смещения на ландшафтной карте – значит, создавать предпосылки для ошибочных решений о размещении хозяйственных угодий и объектов. Однако возможны достаточно высокие скорости смещения границ и без непосредственных изменений морфолитогенной основы. Сильная положительная обратная межкомпонентная связь (саморазвитие), характерная только для одного из смежных элементов, может способствовать его экспансии за счет уменьшения площади соседнего элемента. Примерами могут быть рост болотного массива за счет примыкающего приводораздельного лесного урочища, термокарстовой котловины – за счет плоскобугристого торфяника и т.п. Тем более очевидна подвижность границ

антропогенных модификаций геосистем, в том числе в результате положительных обратных связей (например, зарастание полей кустарником в лесостепной зоне с последующим ростом снегонакопления, изменением водного режима почв и залесением). Назрела необходимость выделения и картирования особой категории *агрессивных урочищ* и их антропогенных модификаций, способных к быстрой экспансии. Интенсивность взаимодействия соседних пространственных элементов может контролироваться конфигурацией границы, которую тоже можно отражать специальными условными знаками в зависимости от масштаба. Извилистая граница, как правило, способствует усилению поперечных потоков вещества и более интенсивному обмену веществом между смежными пространственными элементами, а прямая уменьшает протяженность контактной зоны и усиливает продольные потоки вдоль границы [24]. Иными словами, геометрические свойства пространственных элементов должны рассматриваться как особый фактор, определяющий их функции в ландшафте, а точнее – в системообразующих потоках вещества. К сожалению, в ландшафтоведении практически не получила развития функциональная интерпретация геометрических свойств пространственных элементов и их границ. По иному пути идет англоязычная ландшафтная экология, где именно пространственные свойства и соотношения составляют ядро современного функционального анализа [26; 27].

Границы как следствие смены режимов функционирования. Функционально-динамический критерий разграничения природных комплексов заключается в различии набора и диапазона возможных состояний и режимов круговорота вещества. Морфолитогенные границы не всегда четко отражаются в свойствах почвенно-растительного покрова (например, в условиях преобладания рассеянной радиации при морском климате). С другой стороны, некоторые ландшафтные процессы проявляются непостоянно или даже изредка, но, тем не менее, оставляют след в компонентной структуре, в том числе нарушая равновесность круговорота вещества с сопутствующим накоплением сингенетических образований. Различия в повторяемости таких процессов и ампли-

тудах состояний, вызывающих сильные отклонения от обычного состояния, могут указывать на ландшафтную дифференциацию, которая не всегда объясняется в рамках геотопологического детерминизма. Картографирование фаций и урочищ по формам микро- и мезорельефа [14], может неполно описывать разнообразие режимов функционирования. Тогда именно различие режимов функционирования может стать основанием для разграничения геосистем или, по крайней мере, для индикации различий свойств субстрата при неявных границах в рельефе. Концепция морфологической структуры ландшафта была разработана в основном на примере регионов с эрозионным рельефом, где геолого-геоморфологические границы выражены довольно четко. Однако не менее часто встречаются ситуации постепенных изменений уклонов, кривизны, экспозиции, свойств отложений. При этом далеко не всегда можно установить критическое значение свойства морфолито-генной основы (столько-то градусов, такая-то мощность почвообразующих отложений, такое-то содержание элементов минерального питания и т.п.), которое позволяло бы однозначно провести границу в почвенно-растительном покрове. Информация о повторяемости режимов функционирования может дать основания для разграничения геосистем. Ниже мы разберем пример пространственно-временной организации фитопродукционного процесса как основания для возникновения «пульсирующих» границ геосистем и обособления экотонов.

Материалы и методика исследования. Функционально-динамический подход к выделению ландшафтных границ опирается на использование временного ряда данных для определения диапазона и повторяемости возможных состояний геосистемы. Мы исходим из предположения, что геосистемы определенного таксона имеют характерный для этого таксона набор состояний. В то же время возможно обособление переходных зон между смежными геосистемами, где в определенной пропорции могут чередоваться режимы ядровых частей смежных геосистем.

В качестве информативных показателей функционирования часто используются фитомасса и фитопродуктивность, тесно связанные с транспирацией, поверхностным и подземным стоком режимом влажности

почвы, объемами биологического поглощения и многими другими характеристиками геосистемы. Хорошо известно, что фитомасса чувствительна к сезонным флуктуациям и климатическим трендам. Многолетняя повторяемость характеристик биокруговорота отражает подчиненность геосистемы климату ландшафта как повторяемости погод.

Для демонстрации функционально-динамического подхода к выделению границ между геосистемами ранга урочищ мы использовали пример степного ландшафта участка «Айтуарская степь» государственного заповедника «Оренбургский» на Южном Урале (Кувандыкский район Оренбургской области). 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-типчачковыми степями на черноземах южных маломощных сильнокаменистых поверхностно-карбонатных [19; 21]. В качестве исходного материала использованы вегетационные индексы NDVI, рассчитанные по многоканальным космическим снимкам со спутников Landsat 5, 6, 8, характеризующие зеленую надземную фитомассу, цифровая модель рельефа с разрешением 30 м и данные полевых описаний. Ранее было установлено, что коэффициенты корреляции между сырой надземной фитомассой и NDVI в срок измерения составляют около 0,6 [19], что позволяет использовать индексы как индикаторы зеленой фитомассы. Используются NDVI, рассчитанные за 38 сроков с 1984 по 2019 г. Для каждого срока установлено положение кластеров повышенной и пониженной фитомассы методом «анализа горячих пятен» (Hot spots analysis) средствами ГИС ArcMap 10.3. Горячие и холодные пятна NDVI рассчитаны по статистике Гетис-Орда с фиксированным размером окрестности 300 м при Евклидовой дистанции и способе концептуализации пространственных отношений «обратная квадратичная дистанция», которая уменьшает вес по мере удаления. Метод анализа горячих пятен довольно обычен для социально-экономической географии (при анализе ареалов заболеваний, криминальных событий и т.п.) [25], но пока практически не применялся в ландшафтоведении.

Для каждого пиксела была рассчитана повторяемость возникновения «горячих пятен» в долях 1 от общего числа сроков и составлена соответствующая карта. Известно, что в степном ландшафте фитомасса контролируется в основном доступностью влаги, особенно в летний засушливый период [9]. Исходная гипотеза состояла в том, что «горячие пятна» соответствуют луговому типу функционирования фитоценозов, который отличается от степного продолжением вегетации в течение всего лета, что должно проявляться в устойчивом пятне повышенной (относительно степного фона) фитомассы. Таким образом, мы сосредотачиваем внимание на разделении геосистем лугового и степного типов.

По цифровой модели рельефа рассчитывались морфометрические показатели, характеризующие перераспределение влаги (индекс конвергенции, крутизна, продольная и поперечная кривизна, положение относительно тальвега, площадь водосбора и др.), которые использовались для определения геоморфологических условий роста фитомассы до значений, превышающих типичные для степей.

Карта «горячих пятен» накладывалась на карту урочищ [21] для сопоставления результатов функционально-динамического и классического структурного подхода к выделению границ.

Результаты исследования. Анализ геоморфологических условий возникновения пятен повышенной фитомассы («горячих пятен») показал следующее. Среди морфометрических параметров наибольший вклад в распознавание нестабильных (повторяемость «горячих пятен» 0,4–0,6) и стабильных по динамике фитомассы пикселов вносят индекс конвергенции и поперечная кривизна, особенно на склонах. Периодически возникающий повышенный приток влаги (ложбина на склонах, суженные части балок и лощин) вызывает возникновение горячего пятна, которое потом исчезает. Такие участки можно назвать зонами функциональной нестабильности. В пределах склоновых урочищ зоны функциональной нестабильности приурочены к позициям, максимально удаленным от середины склона при повышенной площади водосбора в нижней части склона. Приток

влаги в нижнюю часть склона, вызывающий возникновение горячего пятна повышенной фитомассы, – событие равновероятное с отсутствием такового.

Зоны функциональной нестабильности определяются как территории с высокой повторяемостью отклонений от фоновой внутрисезонной динамики фитомассы с разным знаком [19] и периодическим (с вероятностью около 0,5) возникновением «горячих пятен» повышенной фитомассы по сравнению с окрестностью. Наибольшая площадь зон функциональной нестабильности (41%) приходится на мезофитные луга и черноольшанники, часто (15%) – на луговые степи. Практически не встречаются такие зоны в сухостепных фитоценозах каменистых южных склонов и типичностепных фитоценозах плато и пологих склонов. Изредка «горячие пятна» могут возникать в фитоценозах кустарниковых степей.

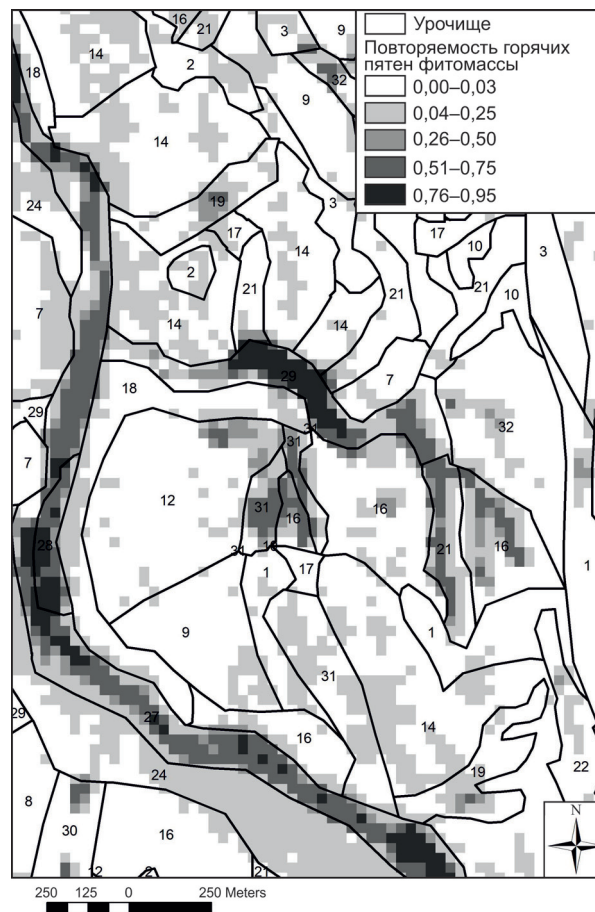
Расчет связей между принадлежностью к видам урочищ и к зонам максимальной пространственной и временной нестабильности фитопродуцирования методом кросстабуляции показал, что последние чаще встречаются в консеквентных (совпадающих с направлением пластов осадочных пород) лощинах, чем в субсеквентных (секущих пласты). Повышенная доля зон нестабильности приходится на покатые слаборасчлененные склоны, прирусловые врезки крупных балок; минимальная – на гребни, плато, останцовые холмы, седловины, подсклоновые шлейфы, а также на галоморфные урочища разных позиций в рельефе.

Максимальная доля площади со стабильной внутрисезонной динамикой при полной невозможности возникновения горячих и холодных пятен фитомассы характерна для амфитеатрообразных понижений в верховьях балок, для крутых аструктурных склонов, округловершинных гребней. В таких урочищах максимальная доля площади занята пикселями, которые никогда не отличаются от окружения и всегда подчиняются фоновой внутрисезонной динамике в полном соответствии с погодной ситуацией. Иначе говоря, такие урочища при различии фитоценозов и почв всегда строго подчиняются погодным флуктуациям, характерным для климата степного ландшафта и вызывающим колебания влажности почв, не выходящие за пределы «степного» диапазона».

На рисунке показан фрагмент контурной части ландшафтной карты на фоне карты повторяемости «горячих пятен» повышенной фитомассы. Выделим три вида информации, которая позволяет уточнить понимание про-

странственной дифференциации, временной организации и динамики границ геосистем.

Во-первых, в пределах балочных и лоцинных урочищ хорошо различимы группы фаций: а) с устойчиво повышенной (относи-



Повторяемость (в долях 1) «горячих пятен» повышенной зеленой фитомассы (по NDVI) за 38 сроков в 1984–2019 гг. Фрагмент карты видов урочищ Айтугарской степи [21]

1–32 – урочища. *Элювиальные с литоземами и черноземами малоомощными поверхностно-карбонатными*: 1 – гребни линейно-грядовые с петрофитными степями; 2 – гребни останцово-грядовые с петрофитными степями; 3 – гребни останцово-конические с полынно-петрофитными степями; 7 – останцовые покатосклонные массивы с ковыльно-овсецово-типчаковыми степями. *Трансэлювиальные с черноземами среднеломощными в сочетании с литоземами*: 8 – склоны покатые структурные слаборасчлененные со степями разнотравно-ковыльно-овсецово-типчаковыми степями; 9 – склоны крутые структурные сильнорасчлененные с петрофитно-ковыльно-грудницево-типчаковыми степями; 10 – склоны покатые слаборасчлененные с разнотравно-ковыльно-овсецово-типчаковыми степями; 12 – склоны крутые аструктурные слаборасчлененные с петрофитно-ковыльно-грудницево-типчаковыми степями; 14 – склоны аструктурные крутые сильнорасчлененные с петрофитно-ковыльно-грудницево-типчаковыми степями; 16 – склоны аструктурные глубокорасчлененные с разнотравно-грудницево-ковыльно-типчаковыми степями; 17 – седловины с разнотравно-ковыльно-типчаковыми степями. *Трансаккумулятивные с черноземами среднеломощными выщелоченными или гидрометаморфизованными*: 18 – шлейфы делювиально-пролювиальные с разнотравно-грудницево-ковыльно-типчаковыми степями; 19 – лоцины консеквентные крутосклонные с лугами и ковыльно-кустарниково-богаторазнотравными степями; 21 – лоцины субсеквентные покатосклонные с лугами и ковыльно-кустарниково-богаторазнотравными степями; 22 – лоцины коленчато-изогнутые с лугами и ковыльно-кустарниково-богаторазнотравными степями; 24 – днища крупных балок пологонаклонные волнистые с овсецово-разнотравно-типчаково-ковыльными степями; 27 – прирусловые врезы в днищах крупных балок с пырейно-осоково-тростниковыми лугами; 28 – прирусловые врезы в днищах крупных балок с черноольшанниками таволгово-тростниковыми; 29 – балки малые консеквентные покатосклонные с лугами и ковыльно-кустарниково-богаторазнотравными степями; 30 – балки малые субсеквентные покатосклонные с лугами и ковыльно-кустарниково-богаторазнотравными степями; 31 – лоцины пологосклонные с лугами и ковыльно-кустарниково-богаторазнотравными степями; 32 – амфитеатрообразные понижения в верховьях балок с ковыльно-богаторазнотравными степями.

тельно степного фона) фитомассой, б) с периодически повышенной фитомассой, в) без «горячих пятен». Ареалы с близкой к 0 повторяемостью «горячих пятен» означают, что, несмотря на различия видового состава, по зеленой фитомассе они обычно принципиально не отличаются от фоновых степных урочищ склонов. Точнее, даже если местами возникает большая фитомасса «лугового» (интразонального) уровня, то полноценных устойчивых кластеров с такими характеристиками (как в центральной части урочища 29) не формируется. Иными словами, высокая влажность почвы, обеспечивающая функционирование по луговому типу без летнего перерыва вегетации, далеко не постоянно и не повсеместно достигается в пределах урочищ отрицательных форм рельефа. Некоторые группы фаций в лощинах ближе к степному типу функционирования (с летним перерывом вегетации), чем к луговому, либо состоят из контрастных «степных» и «луговых» фаций.

Во-вторых, информация об устойчивости пятен повышенной фитомассы позволяет описать взаимодействие двух типов ландшафтной упорядоченности – векторной и ячеистой. Группа урочищ 21, 29 и 31 входит в единую бассейновую геосистему, которая, по [13], представляет собой геоциркуляционную структуру, связанную нисходящими конвергирующими потоками воды, растворенных и твердых веществ. Рисунок четко показывает наличие условий накопления влаги в урочищах лощин и балок по высокой повторяемости «горячих пятен» повышенной фитомассы. Известно, что увеличение площади водосбора обычно приводит к нарастанию объема стока и влагообеспеченности дна. Однако в описываемом случае картина оказывается более сложной. По рисунку видно, что верхние части лощин не формируют «горячих пятен». Следовательно, мы имеем основания считать фитоценозы принадлежащими к степному типу растительности, как и на примыкающих склонах. В средней и/или нижней частях лощин повторяемость «горячих пятен» закономерно возрастает, что указывает на устойчивое достаточное увлажнение и хорошие условия для мезофильной растительности (вейник наземный, кострец безостый, кровохлебка лекарственная и др.). Казалось бы, в еще большей степени эта закономерность ожидаема для урочища балки

(№ 29). Однако существенные коррективы вносит геологическое строение, формирующее ячеистую форму упорядоченности на фоне векторной. Особенность Айтуарской степи заключается в пестром чередовании пластов песчаников, аргиллитов, конгломератов, известняков – то есть пород с разной фильтрационной способностью. Кроме того, эти пласты изогнуты в антиклинальные и синклинальные складки и местами выходят на поверхность торцами, что резко увеличивает подземный сток. Урочище балки (№ 29), выделенное традиционным способом (по мезоформе рельефа) фактически не является единым по способу функционирования из-за неодинаковой способности коренных пород удерживать влагу. И в центральной, и в нижней частях имеются участки, где влага «проваливается» в пласты. В результате ожидаемого сплошного кластера большой фитомассы в днище нет. Описанная закономерность позволяет индизировать геологические различия и тем самым получить более корректные основания для разграничения геосистем, чем простая принадлежность к мезоформе рельефа. Итак, наложение геоциркуляционной и геостационарной структур формирует сложную мозаику мезофильных и ксерофильных сообществ в днище балки. Применив на следующем этапе визуальное дешифрирование космоснимков высокого разрешения и полевые наблюдения, можно разделить участки с мозаичной и монотонной фациальной структурой урочищ. В первом случае (мозаичность) кластеры большой фитомассы не формируются из-за пестроты условий увлажнения, хотя отдельные территориальные единицы (в данном случае – пиксели) могут ее иметь. Во втором случае (монотонность) либо «горячие пятна» с луговыми сообществами индизируют надежную постоянную обеспеченность почв влагой в течение вегетационного периода, либо сообщества принадлежат тому же степному типу растительности, что и на окружающих склонах.

В-третьих, пространственная картина повторяемости «горячих пятен» повышенной фитомассы позволяет распознать резкие и постепенные границы между разными типами функционирования. Рисунок показывает на многих отрезках снижение повторяемости «горячих пятен» при переходе от днища лощины или балки к нижней части склона, которая, как правило, перекрыта

делювиальным шлейфом, часто нечетко выраженным орографически. Это означает, что в зависимости от гидротермических условий конкретного года или сезона активизация гравитационного потока влаги вниз по склону или по ложине фактически по уровню накопления фитомассы присоединяет подножье склона к днищу эрозионной формы. При менее благоприятных гидротермических условиях фитомасса таких переходных позиций не отличается от фитомассы на склонах. Очевидно, что причина может заключаться как в количественных флуктуациях фитомассы при неизменном видовом составе, так и в динамике видового состава. В последнем случае фитоценоз время от времени «включает резервы»: получают преимущества либо более ксерофильные, либо более мезофильные виды. Возможна биогеохимическая трактовка таких колебаний режима функционирования. Реализуя стратегию максимально возможного удержания минеральных веществ от выноса и уменьшения зависимости от среды, фитоценоз при росте риска вымывания питательных веществ из почв наращивает фитомассу, в том числе за счет перехода доминирования к высокопродуктивным видам. При снижении такого риска в засушливые периоды преимущество могут получать виды с меньшей фитомассой, но с повышенной зольностью (полынь австрийская, грудница шерстистая и др.). Таким образом, применяемый метод позволяет идентифицировать «пульсирующие» границы. Такие границы могут не совпадать с перегибами рельефа (традиционно принимаемыми за границы фаций и урочищ), но зато индицируются по режиму функционирования. Ширина полосы, в которой возможны колебания фитомассы от фоновых значений ландшафта (в данном случае – степного) до резко повышенных значений, может рассматриваться как экотонная полоса (в данном случае – между зональными степными и интразональными луговыми геосистемами). В зависимости от ее ширины и выбранного масштаба картографирования такая полоса может приобретать статус самостоятельного природного комплекса или показываться как граница особого рода, отличная от резких границ. К сожалению, такое разделение границ не получило пока развития в ландшафтном картографировании, хотя более полувека назад это предлагал А.Г. Исаченко [5].

Выводы. При обычных «разовых» полевых исследованиях с целью ландшафтного картографирования принимается во внимание структурный аспект: геоморфологические поверхности, состав и показатели развития фитоценоза, набор и мощности почвенных горизонтов и т.д. Используя метод анализа «горячих пятен», мы получаем возможность по функционально-динамическим характеристикам, полученным дистанционно, детализировать структуру геосистем и выявить взаимодействие разных форм пространственной упорядоченности. Подход основан не только на анализе динамики собственных свойств территориальной единицы, но и на анализе пространственного контекста через противопоставление некоторого фонового режима функционирования и отклонений от него. Диапазон колебаний показателей функционирования (в приведенном примере – фитомассы) в ходе многолетней и сезонной динамики служит полезным индикатором для локализации границ на картах, оценки их устойчивости во времени, определения ширины переходных полос. С практической точки зрения такая информация полезна для оценки стабильности факторов, влияющих на получение продукции, и прогнозируемости самой продукции, например, влагообеспеченности, продуктивности, видового состава пастбищ или культурных фитоценозов.

Хотя пример, приведенный в этой статье, относится к исследовательским задачам ландшафтоведения, описанный подход представляется достаточно универсальным и конструктивным для картографических задач и других географических наук. Он применим в тех случаях, когда: а) имеется в распоряжении временной ряд регулярных данных (растры или сеть равноудаленных точек), б) присутствуют контрастные по свойствам пространственные единицы, в) есть доминирующий пространственный элемент с репрезентативным для большой территории режимом функционирования. Тогда границы пространственных единиц приобретают не только пространственную, но и динамическую трактовку. В зависимости от масштаба картографирования они могут превращаться из линий в полосы. Во многих случаях такие переходные полосы выполняют буферные функции, сглаживая негативные воздействия смежных простран-

ственных элементов друг на друга. Иногда полоса с высокой изменчивостью режимов функционирования может индицировать эволюцию пространственной структуры территории, выраженную в смещении границ. Наконец, информация об устойчивости режимов функционирования может указывать на пластичность геосистемы, то есть

способность переходить из одного устойчивого состояния в другое в зависимости от флуктуации внешних условий.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-05-00464).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арманд А.Д. Необратимые изменения ландшафтов // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Мат-лы XI Междунар. ландшафтной конф. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2006. С. 31–33.
2. Арманд А.Д., Таргульян В.О. Принцип дополнительности и характерное время в географии // Системный подход в географии: тезисы докл. / Ин-т географии АН СССР. М., 1972. С. 18–23.
3. Бобра Т.В. Ландшафтные границы: выявление, анализ, картографирование. Симферополь: Таврия-Плюс, 2005. 168 с.
4. Гродзинський М.Д. Ландшафтна екологія. Київ: Знання, 2014. 550 с.
5. Исаченко А.Г. Основы ландшафтоведения и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1965. 328 с.
6. Исаченко Г.А. Дискретность и континуальность в теории ландшафтоведения // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. М.–СПб., 1997. С. 23–25.
7. Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 232 с.
8. Ласточкин А.Н. Общая теория геосистем. СПб.: Лема, 2011. 980 с.
9. Мордкович В.Г. Степные экосистемы. 2-е изд. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2014. 170 с.
10. Николаев В.А. К теории ландшафтного полигенеза // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2006. № 6. С. 3–8.
11. Пузаченко Ю.Г. Теоретико-методологические основы долговременных эколого-географических исследований на территории заповедников // Вопросы географии. Сб. 143: Географические основы заповедного дела. М.: ИД «Кодекс», 2017. С. 192–233.
12. Солнцев В.Н. О гравитационной парадигме ландшафтоведения // Ландшафтный сборник (Развитие идей Н.А. Солнцева в современном ландшафтоведении). М.–Смоленск: Ойкумена, 2013. С. 155–169.
13. Солнцев В.Н. Структурное ландшафтоведение: основы концепции. // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов. Тезисы докл. X ландшаф. конф. СПб: РГО, 1997. С. 11–14.
14. Солнцев Н.А. Учение о ландшафте. Избранные труды. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 384 с.
15. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с.
16. Сысуев В.В. Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: ЛЕЛАНД, 2020. 600 с.
17. Хорошев А.В. Геоостационарные и геоциркуляционные структуры в среднетаёжном ландшафте // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2005. № 3. С. 23–28.
18. Хорошев А.В. К дискуссии о неоландшафтоведении: детерминированность, полимасштабность, полиструктурность // Изв. РГО. 2014. Т. 146. Вып. 4. С. 58–69.
19. Хорошев А.В. Ландшафтные условия стабильности фитопродукционного функционирования в Айтуарской степи (Южный Урал) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 2. С. 82–91.
20. Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: КМК, 2016. 416 с.
21. 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.
22. Хорошев А.В., Авессаломова И.А., Дьяконов К.Н., Иванов А.Н., Калуцков В.Н., Матасов В.М., Низовцев В.А., Сысуев В.В., Харитонова Т.И., Чижова В.П., Эрман Н.М., Лоцинская Е.С. Теория и методология ландшафтного планирования. Отв. ред. К.Н. Дьяконов, А.В. Хорошев. М.: КМК, 2019. 444 с.
23. Хорошев А.В., Алещенко Г.М. Методы выделения геосистем с единством межкомпонентных отношений // География и природные ресурсы. 2008. № 3. С. 120–126.
24. Forman R. Land Mosaics. Cambridge, 2006. 632 p.
25. Haining R. Spatial Data Analysis. Theory and Practice. Cambridge University Press, 2003. 432 p.
26. Turner M.G., Gardner R.H. Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process. New York: Springer, 2015. 482 p.
27. With K.A. Essentials of Landscape Ecology. Oxford: Oxford University Press, 2019. 641 p.

Статья поступила в редакцию журнала 14 июня 2022 г.

Об авторе:

Хорошев Александр Владимирович – доктор географических наук, профессор кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

Для цитирования:

Хорошев А.В. Функционально-динамический подход к исследованию ландшафтных границ // Региональные исследования. 2022. № 3. С. 60–70.

DOI: 10.5922/1994-5280-2022-3-6

Functional-dynamic approach to studying landscape boundaries

A.V. Khoroshev

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia
e-mail: avkh1970@yandex.ru

We provide a historical overview of the concepts of discreteness and continuity in the landscape sphere taking into account the concepts of characteristic time scale, factorial-dynamic series, and feedbacks between geocomponents. Promising directions for studying landscape boundaries were identified in several aspects: as a product of choosing the research scale, as a condition for the development of synergistic processes, as a result of changing types of intercomponent connections, as indicators of the spatial pattern dynamics, as a consequence of a change in functioning modes. We advocate a functional-dynamic approach to identifying landscape boundaries, which is based on the use of a time series of data to determine the range and frequency of possible geosystem states. On the example of the protected landscape “Aituar steppe” in the Southern Urals, we demonstrate the application of the hot spots analysis to distinguish natural complexes with different spatial and temporal organization of the phytoproduction process. The time series of vegetation indices NDVI was used to map the frequency of patches of increased phytomass and to identify pulsating boundaries between steppe and meadow units. The range of fluctuations in performance indicators in the course of long-term and seasonal dynamics serves as a useful indicator for localizing boundaries on maps, assessing their stability over time, and determining the width of ecotones.

Keywords: geosystem, dynamics, functioning, NDVI, phytomass, analysis of “hot spots”, steppe, meadow, Southern Urals.

Received 14.06.2022