

УДК 911.52(470.11)

## ПОЛИМАСШТАБНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МЕЖКОМПОНЕНТНЫХ ОТНОШЕНИЙ В ЛАНДШАФТЕ<sup>1</sup>

© 2010 г. А.В. Хорошев, К.А. Мерекалова, Г.М. Алещенко

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Поступила в редакцию 25.03.2008

Излагается подход к выявлению иерархических уровней организации ландшафта с применением полимасштабного анализа межкомпонентных отношений. Путем перебора разных сочетаний пространственного разрешения и площадного охвата и построения статистических моделей межкомпонентных отношений выявляются “резонансные” сочетания параметров масштаба, когда проявляется согласованное изменение большого количества характеристик. По полученным параметрам модели выявляется ведущий фактор организации для соответствующего иерархического уровня. При таком подходе иерархические уровни не задаются строго по состоянию одного ведущего компонента, а выявляются на основании межкомпонентных отношений, т.е. выявляются сразу целостные ландшафтные структуры. Перебор сочетаний основных параметров масштаба позволяет установить “резонансные” сочетания, которые указывают на объективно существующие межкомпонентные отношения, подчиняющиеся единому фактору пространственной дифференциации. Метод иллюстрируется на примере среднетаежного полигона исследования в Архангельской области на фациальном и урочищном уровнях.

**Проблема полимасштабности организации ландшафта.** Проблема масштаба специально исследуется в зарубежной географической литературе еще в 1934 г. [26]. С 1980-х годов в зарубежной географической и экологической литературе резко возрос поток работ по этой тематике [19]. В ландшафтной экологии развитие этих исследований определили три ключевых публикации [31]. Первая из них [21] заложила основы применения теории иерархии на основе общей теории систем и спровоцировала дискуссию в экологии. Во второй [23] впервые на примере палеоэкологических данных по динамике растительного покрова показана корреляция между пространственными и временными масштабами. В третьей [29] предложена иерархическая концепция экосистем. Одновременно те же вопросы получают освещение в отечественной литературе [8]. Работы Б. Мандельброта [6] по фракталам создали потенциал для разработки правил, по которым результаты наблюдений могут быть экстраполированы из одного масштаба в другой. В настоящее время сформировалось понимание, что для каждой группы экологических и географических процессов могут существовать “предпочтительные” уровни

проявления. Такая сложная многомерная система, как ландшафт, принимает участие одновременно в множестве разноуровневых взаимодействий, поэтому полимасштабность признается как важнейший компонент современного ландшафтного исследования [2].

Масштаб в науке о ландшафте определяется как пространственная и временная параметризация окна восприятия реальности; путем полимасштабной сегментации исследователь ищет градиенты потоков между ландшафтными единицами, что адекватно поиску изменений в пределах гетерогенного объекта [22].

Масштаб имеет два параметра – разрешение и охват. Первое соответствует наименьшей пространственной единице, используемой для сбора данных, второй представляет собой общую площадь, для которой выявляются закономерности пространственной организации и порождающие их процессы. Одним из важнейших является понятие “диапазон масштабов” (domain of scale). Этот термин соответствует отрезку масштабного спектра, в пределах которого структура исследуемого объекта не меняется или меняется монотонно при изменении масштаба. Диапазоны отделены друг от друга “масштабными порогами” – критическими параметрами, при которых происходит

<sup>1</sup> Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-05-00441, 05-05-64335).

изменение относительных вкладов факторов в варьирование исследуемой переменной [27].

Фундаментальное понятие в науке о ландшафте – “масштабирование” (перенос данных или информации с одного масштабного уровня на другой). Одним из важнейших этапов в понимании проблемы масштаба было осознание и детальное описание “проблемы изменяемой пространственной единицы” (MAUP) [30]. Эта проблема вытекает из факта существования бесконечного количества способов, с помощью которых географический район может быть разделен на неперекрывающиеся пространственные единицы. Критерии их выделения задаются целями исследования. При этом MAUP включает: а) варьирование результатов анализа при постепенном агрегировании данных, в меньшее количество более крупных единиц; б) изменчивость результатов при использовании альтернативных способов объединения единиц в одном масштабе.

Следующим шагом к пониманию проблемы масштаба является объяснение и предсказание того, как меняются структуры и процессы при изменении масштаба. В качестве теоретической основы для “связывания” информации между различными пространственными масштабами служит теория иерархии. Объект исследования представлен на уровне “0” (фокальном) как компонент верхнего уровня “+1”. Уровень “+1” задает константы для процессов на уровне “0”, динамика которого определяется механизмами Уровня “–1” [29].

Недавно [32] предложена более емкая основа для масштабирования – иерархическая парадигма динамики пятен. Центральным понятием является “пятно” (patch), определяемое в зарубежной ландшафтной экологии как пространственная единица, отличающаяся от своего окружения по сущности или внешнему облику. В то время как иерархическая теория фокусируется на вертикальной структуре ландшафта, понимаемой в ландшафтной экологии как набор иерархических уровней [32], теория динамики пятен имеет дело с пространственной неоднородностью и горизонтальным взаимодействием компонентов системы. При объединении этих теорий ландшафт может быть описан как иерархическая система пятен, которая различается по строению и пространственному рисунку в разных масштабах. Динамика ландшафта может быть объяснена через взаимодействие составляющих ландшафт пятен, представленных на смежных иерархических уровнях его организации.

**Подходы к выявлению иерархии геосистем.** В ландшафтной экологии сложились несколько

основных концептуальных подходов к проблеме выявления иерархии геосистем.

В российской географии иерархические уровни морфологической структуры ландшафта определены на основании обобщения огромного массива эмпирического материала, здравого смысла и интуиции исследователей. Не в последнюю очередь особенности иерархии были продиктованы спецификой регионов исследования, изначально – эрозионных равнин нормального или слабодифицитного увлажнения с четкими ландшафтными рубежами. Наложила свой отпечаток и цель исследований, связанных с рациональной организацией сельского хозяйства. Необходимо было четко развести “стратегию”, “тактику” землепользования и конкретные агротехнические мероприятия по разным иерархическим уровням организации ландшафта. Особенности генезиса литогенной основы при такой целевой функции ландшафтных исследований и в таких ландшафтах играли ведущую роль, что отразилось в “ряде Н.А. Солнцева” и в иерархии природно-территориальных комплексов (ПТК) [12]. Концепция морфологической структуры не допускала возможности проявления иных факторов дифференциации на том же иерархическом уровне и существования параллельно существующих геосистем с другой пространственной организацией в том же пространстве традиционных урочищ и подурочищ.

С появлением компьютерных технологий расширился диапазон характеристик ландшафта, которые стало возможно привлекать к проверке гипотезы целостности и объективности существования ландшафтных комплексов, прежде всего – за счет характеристики растительного покрова и рельефа, которые можно определить по дистанционным материалам и цифровым моделям рельефа. Однако для многих видов ландшафтов характерной проблемой стало “исчезновение” или “расплывание” казалось бы интуитивно очевидных межкомпонентных связей, т. е. закономерных отношений между горными породами, почвами, растительностью, водами, воздухом, животным миром. Слишком много характеристик растительности (какие из них главные и второстепенные?) не меняется при изменении почв, и наоборот. Слишком часто резкие изменения значений некоторых свойств оказываются несогласованными с классически выделенными по мезорельефу границами урочищ, а пространственное варьирование внутри урочища (одной мезоформы) часто не удается объяснить влиянием фактора более низкого уровня, например микрорельефом или свойствами отложений. Начиная с работ К.Г. Рамана

[11] растет интерес к концепции полиструктурности, т.е. одновременного сосуществования в пространстве относительно независимых систем, подчиняющихся факторам принципиально разной природы. В материалах последней Ландшафтной конференции [5] прослеживается явное приращение ей роли более общей закономерности, чем концепция морфологической структуры (В.Н. Солнцев, Ю.Г. Пузаченко, М.Д. Гродзинский, В.В. Сысуев, Э.Г. Коломыц, П.Я. Бакланов, В.Н. Петлин, К.В. Чистяков, А.К. Черкашин и др.) [5].

Другой подход к выявлению иерархии ПТК не постулирует иерархические уровни *a priori* [9, 10, 26, 32]. Материалами становятся цифровые модели рельефа и дистанционные данные, которые можно представить в виде континуума. Рельеф выступает как главный организующий фактор – матрица, детерминирующая состояние других компонентов. Растительный покров является индикатором смен типа пространственной организации и, следовательно, типа процесса в пространстве или при переходе на другой иерархический уровень. Строгими количественными методами (спектральный и фрактальный анализ) выявляются объективно существующие иерархические уровни по одному ведущему компоненту, а затем выясняется степень соответствия им пространственной дифференциации других компонентов. В результате могут быть получены ареалы как жестко детерминированной привязки одних компонентов к другим, так и ареалы несоответствий, которые часто трактуются как результаты неравновесных отношений, антропогенных воздействий, саморазвития [15].

Третий подход основан на выявлении иерархических уровней “снизу” полимасштабным анализом. Путем перебора разных сочетаний разрешения и площадного охвата и построения статистических моделей межкомпонентных отношений выявляются сочетания параметров масштаба, при которых некоторое множество характеристик меняется в пространстве согласованно. Последнее может свидетельствовать о наличии общего для них фактора дифференциации. Это сочетание параметров масштаба условно можно назвать “резонансными”. При таком подходе иерархические уровни не задаются строго по состоянию одного ведущего компонента, а выявляются на основании межкомпонентных отношений, т.е. выявляются сразу целостные ландшафтные структуры. Они будут относиться к категории парциальных или полных ландшафтных систем в зависимости от набора включаемых в модель характеристик. Близок к нему метод объекто-специфичного анализа канадских исследователей, которые по характер-

ным скачкам дисперсии выстраивают иерархию для каждого пространственного элемента ландшафта, выявленного по растительности [24]. Фактически здесь тоже ищут “резонансные” сочетания параметров, но на основании только одного физиономического компонента, а не отношений между компонентами. Зависимость целостности структуры экосистемы (минимум-ареал выявления) от масштаба исследовал также Б.В. Виноградов [1]. Нам представляется, что разработка подходов к выявлению целостных ландшафтных структур на основе сходства межкомпонентных отношений и характерных масштабов их реализации – одна из актуальных задач современного ландшафтоведения.

С 2004 г. в МГУ разрабатывается метод полимасштабного мультирегрессионного моделирования межкомпонентных отношений [16, 17], позволяющий реализовать концепцию полиструктурности организации ландшафта. Она подразумевает построение серии регрессионных уравнений, связывающих группы свойств компонентов ландшафта, в скользящем квадрате для группы операционных территориальных единиц (ОТЕ), сопоставимых с тем или иным рангом ПТК, при варьирующем разрешении и территориальном охвате. Мультирегрессионные уравнения имеют ряд очевидных преимуществ и позволяют выявить характерные масштабы реализации межкомпонентных отношений [17]. Однако есть и трудности применения метода (трудоемкость построения нелинейных мультирегрессионных моделей, громоздкость и трудности интерпретации). В то же время, на современном этапе становится понятно, что именно нелинейные отношения наиболее обычны в ландшафте, являясь источником его развития и предметом изучения при анализе устойчивости [28]. Трудности применения метода связаны и с разграничением ареалов с разными типами межкомпонентных отношений. Она возникает из-за того, что классификация ПТК по коэффициентам мультирегрессионного уравнения присваивается центральному пикселу скользящего окна, а периферия окна попадает в сферу влияния сразу нескольких, иногда противоположных по смыслу типов отношений. В чистом виде каждый тип отношений существует только в центральной части относительно обширного гомогенного ареала, куда не “достанет” влияние ядра другого типа отношений. Если на небольшом расстоянии часто происходит смена типов отношений, то это, скорее всего, свидетельствует либо о многофакторности, либо о неприемлемости данного пространственного масштаба для анализа отношений данного типа.

Современные математико-статистические методы дают возможность повысить объективность выделения традиционных монотонных геосистем посредством применения вероятностного подхода. О монотонности можно говорить лишь тогда, когда в пределах территории с однообразными характеристиками ведущего фактора или компонента однообразны также и другие компоненты, а кроме того значения их свойств своеобразны, т.е. не пересекаются со значениями свойств ПТК, принадлежащих другим классам. Это примерно соответствует понятию “геомер” В.Б. Сочавы [13]. На рубеже веков много говорится о двойственности ПТК – сочетании детерминированной и стохастической (вероятностной) составляющих [3, 20, 25]. Та часть свойств геосистемы, которая строго детерминирована ведущим фактором ее обособления, поддается оценке методами дискриминантного анализа, который дает точный ответ на вопрос о вероятности соответствия ведомых свойств состояниям ведущего фактора [10]. Сочетание на одной территории свойств, типичных для разных состояний ведущего фактора, может быть признаком неравновесности отношений.

Полимасштабный анализ структуры геосистем включает в себя несколько этапов.

*Во-первых*, необходимо определить размеры мельчайших операционных территориальных единиц (ОТЕ, уровень “0”), в роли которых удобно использовать пиксели дистанционного изображения или цифровой модели рельефа (ЦМР). Если речь идет о континуальном представлении, то эта задача включает определение сопоставимости пиксела с модальной или средней площадью ПТК того или иного традиционного ранга, известной по полевым наблюдениям. Очевидно, что разброс значений ПТК обычно велик, особенно в ландшафтах со значительной ролью эрозионных процессов и ледниковой аккумуляции. Поэтому ОТЕ могут не отражать правила, определяющие дифференциацию наиболее мелких ПТК.

*Во-вторых*, необходимо сформулировать гипотезу о размерах окрестности (ПТК уровня “+1”), состояние которой может отражаться на характеристиках ОТЕ. Можно либо задать окрестность, исходя из полевых наблюдений за размерами ПТК (например, средние размеры урочища для ОТЕ ранга фации), либо производить серию экспериментов по оценке плотности связей, меняя размеры окрестности и подбирая “резонансный” уровень. Так или иначе, относя характеристики окрестности к ОТЕ, мы характеризуем ее не только собственными свойствами, но и свойствами соседних территориальных единиц того же ранга,

каждая из которых несет некоторые черты, свойственные единице более высокого ранга. Например, допустим, что в качестве ОТЕ выбрана фация. Характеристикой фации является не только принадлежность к форме микрорельефа – слабо-врезанной ложбине стока (имеющей определенную степень вогнутости и уклон), но и к урочищу пологого (градиент высот) южного (соляная экспозиция, теплообеспеченность) склона, слабо-расчлененного серией многочисленных (горизонтальная расчлененность) неглубоких (вертикальная расчлененность) ложбин, примыкающего к руслу реки (расстояние до водотока). Для соседней снизу фации той же ложбины ее собственные морфометрические характеристики (уклон и вогнутость) могут быть теми же самыми, но приближение ее к руслу разливающейся весной реки (т.е. изменение позиции в форме мезорельефа) может сделать ее более уязвимой к весеннему подъему грунтовых вод. Если увеличить окрестность, свойства рельефа которой соотносятся с фацией, то тем самым высказывается гипотеза о том, что свойства нашей фации (растительность, почвы, воды, и т.п.) зависят от состояния некоторого множества фаций, заключенных в этой окрестности и в совокупности, возможно (но не обязательно), составляющих геосистему более высокого ранга.

На основании некоторого множества ОТЕ можно построить статистическую модель зависимости свойств фации от свойств множества соседних фаций, составляющих вместе урочище или какую-либо другую территориальную единицу. Если множество ОТЕ (в приведенном примере – индивидуальных фаций) рассматривается в пределах территории, сопоставимой по размеру с рангом ландшафта, то модель будет отвечать на вопрос: существует ли в пределах всего ландшафта единое правило, связывающее свойства фаций и свойства заключающих их урочищ. Сравнение качества моделей, построенных для разных окрестностей, позволит оценить адекватность той или иной окрестности для отражения субординации связей между свойствами компонентов ландшафта. Локализация отклонений от модели (например, остатков регрессионного уравнения) дает информацию о местах, где высказанная гипотеза о влиянии окрестности заданного размера на фацию несостоятельна [7]. Тогда очевиден следующий шаг: проверить гипотезу о том, что в данном месте свойства фаций зависят от геосистемы более крупного или более мелкого размера, т.е. произвести перерасчет для окрестности другого размера.

*В-третьих*, необходимо выявить, меняется ли в пространстве тип отношений между свойствами

компонентов ландшафта. Под этим подразумевается: а) набор независимых переменных (например, морфометрических свойств урочища), которые влияют на состояние зависимой переменной (например, глубины грунтовых вод в пределах фации); б) относительные вклады независимых переменных в состояние зависимой; в) общая степень детерминации зависимой переменной совокупностью независимых переменных. Эта задача означает выявление разнообразия факторов организующих территорию на заданном иерархическом уровне. Ее решение позволяет выявлять мозаичные геосистемы с единым фактором внутренней дифференциации, что близко к понятию “геохор” В.Б. Сочавы [13]. Например, уровень грунтовых вод фации определяется степенью расчлененности урочища, и эта закономерность проявляется в пределах некоторой местности. При этом в соседней местности уровень грунтовых вод зависит не от расчлененности, а только от уклонов (преобладает плоскостной поверхностный сток), а в следующей местности – вообще не связан с рельефом, а контролируется механическим составом отложений.

*В-четвертых*, сравнивается вид и качество моделей, которые получены для разных ОТЕ. Если установлено некоторое правило, объясняющее свойства фации контролирующей ролью включающего ее урочища в пределах местности, то ставится вопрос: по такому же или другому правилу урочище зависит от свойств местности в пределах ландшафта? Сравниваются вид и качество уравнений связи между компонентами. Каждую ОТЕ уровня А можно представить как совокупность вложенных в нее ОТЕ уровня Б, взаимодействующих со своими соседями. Предметом анализа становится совпадение или несовпадение закона пространственной дифференциации на уровне А и на уровне Б. Сходство значений и знаков коэффициентов уравнений означает сходство процессов, ответственных за пространственную дифференциацию на смежных иерархических уровнях. Несходство – смену фактора дифференциации.

Проиллюстрируем высказанные представления на примере изучения ландшафтов среднетаежного полигона в Устьянском районе Архангельской области.

**Материалы и методы.** Полигон представляет собой структурно-моренно-эрозионную равнину с варьирующей в зависимости от плотности неотектонических разрывных разрушений степенью расчлененности рельефа. Преобладают сосново-еловые и вторичные березово-осиновые леса на подзолистых и торфянисто-подзолисто-глееватых

почвах в сочетании с верховыми и переходными болотами. Средний размер урочища по результатам ландшафтного картографирования [14] оказался равен  $0.23 \text{ км}^2$ , варьируя в разных местностях от  $0.16$  до  $0.36 \text{ км}^2$ . Средний размер фации около  $30 \text{ м}$  определен по результатам наблюдений на трансекте с регулярным шагом описания и опробования. В данной работе исследовались отношения в парциальной системе “рельеф-растительность” в двух масштабах: на территории около  $300 \text{ км}^2$  с размером ОТЕ (пиксела)  $400 \text{ м}$  и на вложенной в нее территории  $10 \text{ км}^2$  с размером ОТЕ  $30 \text{ м}$ . Выбор размеров ОТЕ обусловлен компромиссом между обычными для территории размерами ПТК, возможностями интерполяции абсолютных высот по топографическим картам и разрешением дистанционных материалов. При этом невозможно постулировать, что ОТЕ указанных размеров строго соответствует урочищам и фациям. Но этого не требуется, поскольку мы фактически “конструируем” мозаичные геосистемы по критерию однотипности межкомпонентных отношений. Можно перебрать разные размеры ОТЕ и построить для них модели межкомпонентных отношений. При этом невозможность построить достоверную модель при том или ином размере ОТЕ может означать неадекватность размера ОТЕ для выявления реально существующих геосистем.

Каждый пиксел охарактеризован собственным свойством – оптической плотностью космического изображения Landsat 7 (зависящей от отражательной способности растительного покрова) – и свойствами вмещающей его единицы, превышающей его линейный размер в 5 раз. Для ОТЕ со стороной  $400 \text{ м}$  по ЦМР масштаба  $1:50\,000$  рассчитаны характеристики степени дренированности рельефа в квадрате со стороной  $2000 \text{ м}$ : вертикальная расчлененность (стандартное отклонение абсолютных высот), горизонтальная расчлененность (сумма длин водотоков), уклон, выпуклость-вогнутость, расстояние до ближайшего тальвега. Эти показатели применены в статистических моделях связей как независимые переменные. Квадрат со стороной  $2000 \text{ м}$  примерно соответствует поперечному размеру плоских междуречных поверхностей и долин с придолинными склонами. Этот уровень исследования ниже называется уровнем А. Размер квадрата позволяет генерализовать небольшие ложбины и западины, но различать малые долины и крупные водосборные понижения в их верховьях. Аналогично на более детальном уровне исследования для ОТЕ со стороной  $30 \text{ м}$  рассчитаны те же характеристики по ЦМР масштаба  $1 : 10\,000$  в квадрате со стороной

150 м. Этот уровень ниже называется уровнем Б. На нем размер ОТЕ позволяет различать формы микрорельефа с амплитудой высот менее 1 м, в том числе мелкие ложбины, западины, поймы малых рек, бровки склонов и т.п.

Преобразованием значений спектральных яркостей каналов космического снимка методом главных компонент (являющимся одним из основных способов уменьшить размерность данных, потеряв наименьшее количество информации) выделено несколько независимых факторов дифференциации растительного покрова. Один из факторов интерпретирован по полевым данным как проявление реакции растительного покрова на варьирование влажности местообитаний, которая выражается в соотношении гидрофильных и мезофильных видов, степени развития мохово-лишайникового покрова, сомкнутости крон и других свойствах. Значения данного фактора, по результатам дисперсионного анализа, достоверно различны между 10 классами гигротопов, выделенных при полевых наблюдениях на 616 точках ( $F = 11.52$  при  $p = 0.0000$ ; тест Kruskal-Wallis 43.13898 при  $p = 0.0000$ ). Максимальные значения достигаются на болотах, минимальные – на хорошо дренированных склонах и сухих песчаных террасах. Выбор этого фактора для анализа (ниже – “фактор влажности”) обусловлен его независимостью от антропогенного изменения растительного покрова, в то время как другие факторы дифференциации отражают антропогенные изменения: соотношение лесных/безлесных участков и соотношение хвойных/мелколиственных пород.

Для каждого пиксела с координатами  $\{x, y\}$  построены мультирегрессионные уравнения ( $z_0 = \langle p, z \rangle + p_0$ , – вектор параметров), описывающие связь свойств растительности, чувствительных к влажности местообитания с характеристиками дренированности рельефа (ниже, для краткости, – система “рельеф-растительность”). Уравнение строилось в статистической выборке  $Z = \{z^j\}$  ( $j = 1, 2, \dots, M^2$ ), состоящей из совокупности векторов  $z^j = \{z^j_i\}$ . Множество  $Z$  формируется на квадрате пикселов со стороной  $M$  и центром с координатами  $\{x, y\}$ , называемым окрестностью точки  $\{x, y\}$ . Размер окрестности соответствует выбранному иерархическому уровню. Далее производился перерасчет и сравнение вида уравнений при меняющемся разрешении ( $R$ ) и территориальном охвате  $M^2$ . Формально такая процедура может быть записана в виде оператора решения задачи регрессионного анализа, а именно  $p = Op(Z, M, R, x, y)$ . Таким образом, вектор параметров  $p$  (коэффици-

ентов регрессионного уравнения) в каждой точке  $\{x, y\}$  зависит от размера окрестности  $M$  и разрешения  $R$ , по существу определяющих гипотетический иерархический уровень. Отсюда следует, что и коэффициент детерминации, определяющий “тесноту” мультирегрессионной связи, будет зависеть от значений  $M$  и  $R$  для каждой точки  $\{x, y\}$ . Можно предположить, что для фиксированного значения  $R$  и изменяющихся значений  $M$  в каждой точке  $\{x, y\}$  и “близких” векторах  $p(x, y)$  переход коэффициента детерминации через максимум будет показывать наличие соответствующего иерархического уровня организации территории. Верификация полученных оценок вида межкомпонентных линейных отношений производилась путем расчета непараметрических корреляций Спирмена, информационных мер связи и детерминанта Якоби [18].

**Результаты.** Сравнение тесноты линейных связей в системе “рельеф-растительность” на двух иерархических уровнях (таблица) показало, что на уровне А зависимость свойств растительности, чувствительных к влажности, от дренированности проявляется чаще, чем на уровне Б. На уровне А наиболее четко эта связь реализуется в переходных зонах от плоских междуречий к пологим придолинным склонам. Линейность отношений сохраняется в пространстве со стороной, пятикратно превышающем размер стороны ОТЕ, более чем на половине площади полигона. Гипотеза о сохранении линейности отношений между свойствами ОТЕ уровня А и свойствами вмещающей ее геосистемы размером более 4 км<sup>2</sup> (например, сопоставимой с местностью), подтверждается на существенно меньшей территории. В то же время есть суженные участки междуречий, где происходит приращение коэффициента детерминации в окрестностях одной и той же ОТЕ уровня А со свойствами вышестоящей геосистемы, для достаточно большой территории, которая по размерам сопоставима, в традиционной иерархии, с ПТК ранга местности. При этом требует проверки гипотеза о возможном сходстве или различии типов отношений, выявляемых при разном территориальном охвате ( $M^2$ ).

В долинах, за исключением некоторых суженных участков, коэффициент детерминации практически всегда уменьшается при увеличении территориального охвата, что свидетельствует о большем разнообразии отношений в системе “рельеф-растительность”, чем на водораздельных поверхностях. Иными словами, характерное пространство проявления межкомпонентных отношений сокращается в долинах.

**Таблица.** Доля площади, охваченной достоверными линейными отношениями в системе “рельеф-растительность” с коэффициентом детерминации более 0.3

Окрестность со стороной в пикселах (М)	Операционная территориальная единица (размер пиксела R):			
	400 м (уровень А)		30 м (уровень Б)	
	Размер стороны квадрата на местности (площадь)	% $r^2 > 0.3$	Размер стороны квадрата на местности (площадь)	% $r^2 > 0.3$
5	2000 м (4 км <sup>2</sup> )	64	150 (0.0225 км <sup>2</sup> )	34
9	3600 м (12.96 км <sup>2</sup> )	20	270 (0.0729 км <sup>2</sup> )	6
13	5200 м (27.04 км <sup>2</sup> )	15	390 (0.1521 км <sup>2</sup> )	3
17	6800 м (46.24 км <sup>2</sup> )	8	510 (0.2601 км <sup>2</sup> )	1

На уровне Б доля пространства с проявлением линейных отношений существенно сокращается. ОТЕ уровня Б зависит от свойств совокупности своих соседей в пределах окрестности, с размерами не более 0.0225 км<sup>2</sup> и то не более чем на трети территории. Но уже в пределах пространства с размерами около 0.15 км<sup>2</sup>, видно, что линейность связи не выдерживается. Это доказывает, что дифференциация фаций по режиму увлажнения мелких единиц, сопоставимых с фациями, в основном, особенно на междуречных поверхностях, определяется свойствами нанорельефа, не отражаемого ЦМР данного разрешения (R), или другими факторами – например, свойствами почвообразующих отложений или близостью к прогрессирующим очагам саморазвивающегося заболачивания.

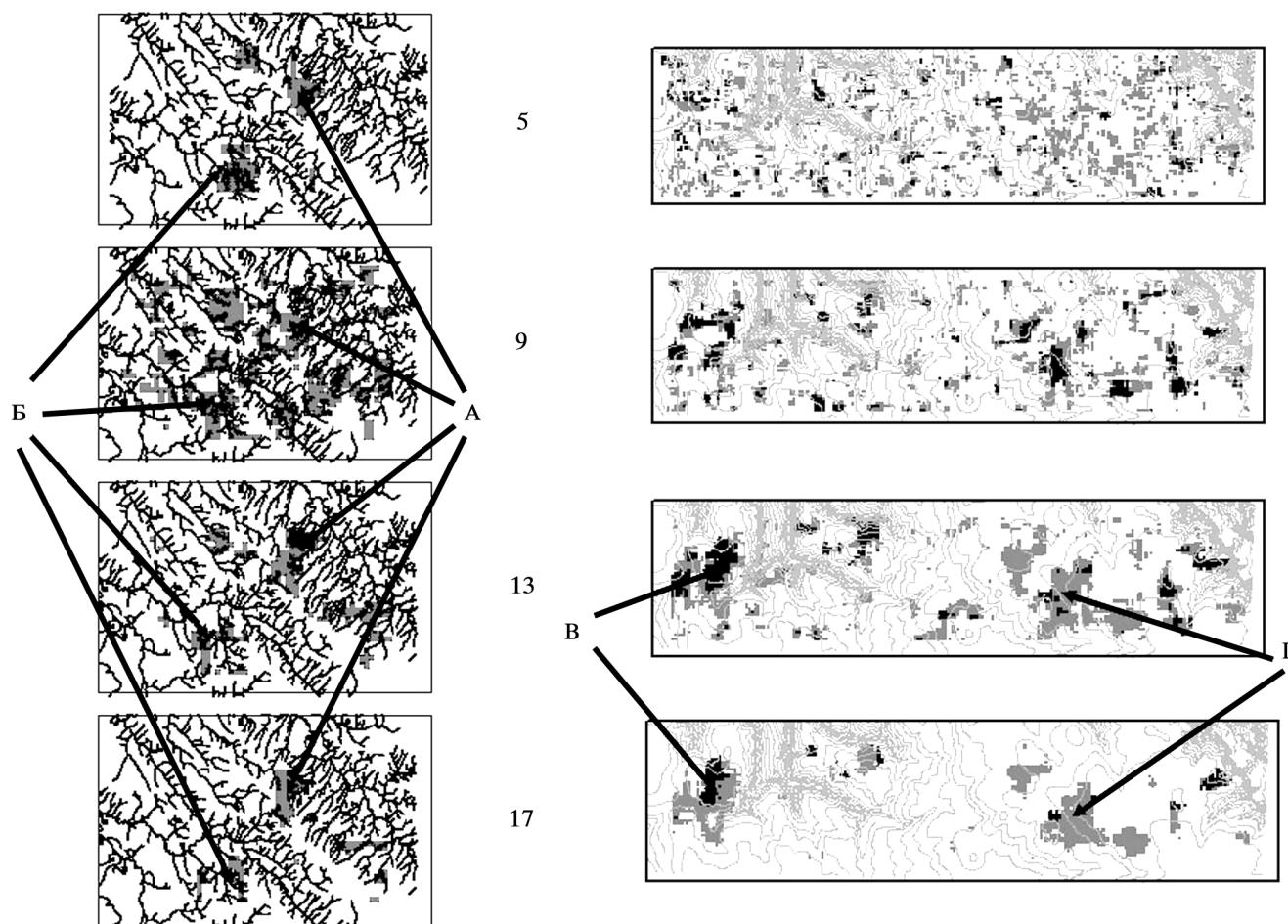
Проверка гипотезы о сохранении типа отношений при увеличении территориального охвата требует определения физического содержания разных типов отношений, возникающих в каждом новом масштабе. Это осуществлено посредством классификации ОТЕ (со стороной 400 и 30 м) по стандартизованным коэффициентам регрессионного уравнения. Подробная интерпретация содержания всех выделенных классов отношений приводится в работе [17].

Приведем результаты исследований на примере анализа одного из классов отношений в системе “рельеф-растительность”, когда рост влажности местообитания происходит при увеличении вертикальной расчлененности, уменьшении уклонов горизонтальной расчлененности процессом, контролирующим влажность, в этом случае является концентрация стока в слабопологих днищах глубоковрезанных долин.

При последовательном увеличении территориального охвата расчета (т.е. предполагаемой площади выявления данного типа отношений) выявляется несколько закономерностей (рис. 1).

На уровне А отношения данного типа наиболее ясно выявляются для квадратной окрестности со стороной М = 2000 м (т.е. в 5 раз превышающей линейный размер ОТЕ и в 25 раз – ее площадь), но на преобладающей части территории сменяются иными типами при большем территориальном охвате. В то же время существуют области неправильной формы со средним диаметром 3–4 км, приуроченные к узким междуречьям и примыкающим верхним частям долин (рис. 1, А-Б), с устойчивым расположением ядра отношений данного типа при любом размере окрестности, т.е. расчет в малой окрестности выявляет лишь часть функционально единого ареала.

На уровне Б отношения данного типа лучше проявляются при увеличении территориального охвата от 25-кратного по отношению к площади ОТЕ (квадратная окрестность со стороной 150 м) к 289-кратному (квадратная окрестность со стороной 510 м). При этом четко выделяются два ядра ареалов с отношениями данного типа, расположенные в верховьях малых ручьев. Один из ареалов (рис. 1, В) в наиболее концентрированном виде существует для окрестности со стороной 510 м и совпадает с ядром ареала отношений того же типа, выявленного для уровня А, что показывает однотипность отношений на разных иерархических уровнях. Следовательно, в этом ареале мы имеем единый тип отношений “рельеф-растительность” для всех ОТЕ со стороной 30 м в пределах слабовыпуклой поверхности междуречья с сосняками можжевельниковыми свежих и влажных гигротопов на агродерново-подзолистых, местами глееватых почвах (окрестность 510 м). На этом общем фоне типы отношений “рельеф-растительность” для ОТЕ уровня Б внутри не больших геосистем (окрестность 150 м) могут варьировать: например, когда влажность местообитания возрастает по мере уменьшения вертикальной расчлененности и приближения к водотокам, т.е. в ПТК слабоврезанных верховий ручьев.



**Рис. 1.** Влияние размеров операционной территориальной единицы (ОТЕ) и территориального охвата на площадь выявления типа отношений в системе “рельеф-растительность”, при котором влажность местообитания контролируется концентрацией стока в слабологих днищах глубокооврезуемых долин при суходольном режиме территорий с густой сетью неглубокооврезуемых водотоков. Тип отношений определен по сходству знаков и величин регрессионных коэффициентов уравнения для пикселей скользящего квадрата, отнесенных к центральному пикселу.

Серый оттенок соответствует ареалам проявления данного типа отношений, черный оттенок – ареалам типа отношений со сходными по знаку, но иными по модулю вкладками характеристик рельефа в варьирование влажности местообитания. Сторона ОТЕ: левая колонка – 400 м (сплошными линиями показана гидрографическая сеть), правая колонка – 30 м (сплошными линиями показаны изолинии рельефа). В рядах показаны ареалы проявления отношений при размерах стороны скользящего квадрата, соответственно в 5, 9, 13, 17 раз больше, чем ОТЕ. А, Б, В, Г – пояснения см. в тексте.

Другой ареал (рис. 1, Г) расположен на территории с чередованием плоских поверхностей неотектонических блоков с сырыми ельниками, покатыми склонами блоков со свежими ельниками и межблоковых понижениях с верховыми березово-сосновыми болотами. Он оптимально проявляется для окрестности со стороной 390 м. Этот ареал расположен внутри области отношений других типов, на уровне А, причем различающихся в зависимости от размеров окрестности расчета. Поэтому для него можно говорить о различии факторов организации на разных иерархических уровнях.

Следует особо отметить, что для уровня Б при длине стороны ОТЕ 30 м характерно существо-

вание относительно крупных ареалов однотипных межкомпонентных отношений только в том случае, когда территориальный охват расчета соответствует среднему для полигона размеру урочищ, т.е. сторона скользящего квадрата составляет 390–510 м. При меньшей окрестности (не превышающей 9-кратной длины стороны ОТЕ) ареалы однотипных отношений не бывают крупными. Иначе говоря, тип зависимости свойств фаций от свойств подурочищ меняется в пространстве гораздо чаще, чем типы зависимости от промежуточных между А и Б уровней. Эта закономерность выдерживается для всех 8 типов отношений в системе “рельеф-растительность”, идентифицированных на крупномасштабном по-



лигоне [7, 17]. Что касается уровня А, то характерна совершенно другая картина: типы зависимости свойств ОТЕ уровня А от свойств вмещающей геосистемы могут не меняться на протяжении 4–5 км, т.е. расстояния, более чем в 10 раз превышающего длину стороны операционной единицы (400 м).

Последовательно сопоставляя по такой схеме ареалы проявления типов межкомпонентных отношений при разных ОТЕ и территориальных охватах, можно для каждого участка полигона определить количество иерархических уровней процессов, ответственных за пространственную дифференциацию, природу этих процессов, ареалы однотипности межкомпонентных отношений на разных уровнях, площадь выявления отношений разных типов.

Все вышесказанное относится только к линейным связям между свойствами ландшафта. Методы оценки нелинейной составляющей межкомпонентных отношений пока слабо разработаны. Однако можно говорить о комбинации несложных методов, которая позволяет в первом приближении установить очаги отношений со значительной нелинейной составляющей и соответствующий иерархический уровень ландшафтной организации. А.К. Черкашиным и его сотрудниками в качестве одного из методов оценки функциональной целостности геосистем предложен расчет значений функционального определителя специального вида (определитель Якоби или якобиан), составленного из частных производных от анализируемых функций по пространственным переменным [4]. При наличии функциональной связи якобиан обращается в нуль в окрестности выбранной точки, хотя при этом не дает информации о виде связи. Классификация ОЕ по значениям якобианов позволяет идентифицировать участки, где связь заведомо существует. Если линейность отношений между характеристиками компонентов ландшафта вызывает сомнения, то в дополнение к мультирегрессионному моделированию в скользящем квадрате можно применять непараметрические коэффициенты корреляции. Сопоставление содержания классов отношений, рассчитанных разными методами, для ландшафтов Архангельского полигона дало ряд интересных результатов. Так, оказалось [18], что участки линейных отношений, инвариантных к масштабу, установленные методом классификации коэффициентов линейных регрессионных уравнений, в основном совпадают с ареалами функциональной связи, определенными по якобианам в разных масштабах. Однако при анализе ареалов классов, выделенных по непараметрическим коэффици-

ентам корреляции Спирмена и по линейным регрессионным уравнениям в разных масштабах, для одного из крупных участков междуречья, установлено, что вид отношений меняется в зависимости от масштаба. При увеличении размеров скользящего квадрата от 2000 до 5200 м вид связи совпадает. Но при квадрате со стороной 6800 м появляется расхождение между знаками коэффициентов связи влажности с вертикальной расчлененностью, а коэффициент детерминации линейного уравнения резко уменьшается. Это означает, что функциональная связь влажности с рельефом с высокой достоверностью существует, но носит линейный характер на низких иерархических уровнях, сменяясь нелинейным на более высоком уровне.

**Заключение.** Полимасштабность межкомпонентных отношений – одна из сложнейших для исследования особенностей ландшафтной организации. Поиск строгих количественных способов идентификации объективно существующих иерархических уровней межкомпонентных отношений является актуальной проблемой современного ландшафтоведения, которой пока значительно больше внимания уделяется в англоязычной, нежели в русскоязычной литературе. От ее решения зависит определение разнообразных систем отношений в которых принимает участие каждый ландшафтный комплекс, являющийся объектом природопользования. Знание этих систем отношений необходимо для прогнозирования последствий хозяйственной деятельности, которые могут существенно различаться в зависимости от ограничений на пластичность ландшафтного комплекса, накладываемых ландшафтными системами более высоких рангов. Полимасштабность не следует воспринимать как “дурную бесконечность”. В зависимости от целей исследования те или иные системы отношений могут выходить на первый план и браться за основу классификации и картографирования ландшафтов и ландшафтного планирования. Отношения, рассмотренные в данной статье, могут оказаться существенными при планировании, например, гидромелиоративных мероприятий, прогнозировании процесса заболачивания, организации лесохозяйственных работ и территориальной охраны природы. Если встает задача проектирования сельскохозяйственных или лесохозяйственных нагрузок, охраняемых территорий, то, возможно, придется анализировать другие факторы дифференциации растительности по тому же космическому снимку или по снимкам за другие сезоны, другие характеристики рельефа (например, систему кривизн), другие параметры масштаба могут оказаться основными. Перебор

сочетаний основных параметров масштаба (размера операционной территориальной единицы и территориального охвата) позволяет установить “резонансные” сочетания, которые указывают на объективно существующие межкомпонентные отношения, подчиняющиеся единому фактору пространственной дифференциации. Описанные подходы к исследованию полимасштабности межкомпонентных отношений могут быть полезны для выявления парагенетических мозаичных систем с единым фактором организации, для моделирования временных изменений через закономерности современной пространственной структуры, для определения количества иерархических уровней в ландшафтной системе, для разделения ареалов проявления линейных и нелинейных отношений в ландшафте, для выявления ареалов независимого от литогенной основы саморазвития ландшафтного комплекса.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов Б.В.* Основы ландшафтной экологии. М.: Геос, 1998. 418 с.
2. *Гродзинский М.Д.* Пізнання ландшафту: місце і простір. 2 т. Київ: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”. 2005. Т. 1. 431 с. Т. 2. 503 с.
3. *Исаченко Г.А.* Дискретность и континуальность в теории ландшафтоведения // Структура, функционирование, эволюция природных и антропогенных ландшафтов: Тезисы X ландшафтной конф. М.; СПб., 1997. С. 23–25.
4. Ландшафтно-интерпретационное картографирование / Отв. ред. А.К. Черкашин. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.
5. Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика: Материалы XI Междунар. ландшафтной конф. М.: Изд-во Географического ф-та МГУ, 2006. 788 с.
6. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. М.: Изд-во ин-та компьютерных исследований, 2002. 656 с.
7. *Мерекалова К.А.* Выделение геосистем с единым типом межкомпонентных отношений // Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология. М.: Изд-во Географического ф-та МГУ, 2006. С. 199–203.
8. *Пузаченко Ю.Г.* Пространственно-временная иерархия геосистем с позиции теории колебаний // Вопросы географии. Т. 127. М.: Мысль, 1986. С. 96–111.
9. *Пузаченко Ю.Г., Гагаева З.Ш., Алещенко Г.М.* Сопоставление мелкомасштабной карты ландшафтного покрова с использованием мультиспектральной информации // Изв. РАН. Сер. геогр. 2004. № 4. С. 97–109.
10. *Пузаченко Ю.Г., Онуфреня И.А., Алещенко Г.М.* Количественные методы классификации форм рельефа // Изв. РАН. Сер. геогр. 2002. № 6. С. 17–25.
11. *Раман К.Г.* Пространственная полиструктурность топологических геокомплексов и опыт ее выявления в условиях Латвийской ССР. Рига, 1972. 48 с.
12. *Солнцев Н.А.* Учение о ландшафте. Избранные труды. М.: Изд-во МГУ, 2001. 384 с.
13. *Сочава В.Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 320 с.
14. *Хорошев А.В.* Ландшафтная структура бассейна р. Заячья (Вяжско-Северодвинское междуречье, Архангельская область). М., 2005. 158 с. Деп. ВИНТИ 27.09.2005 № 1253-В2005.
15. *Хорошев А.В.* Геостационарные и геоциркуляционные структуры в среднетаёжном ландшафте // Вест. Моск. ун-та, сер. 5 География. 2005. № 3. С. 23–28.
16. *Хорошев А.В., Алещенко Г.М.* Пространственная дифференциация типов межкомпонентных отношений в ландшафте // Научные чтения, посвящённые 100-летию со дня рождения академика Виктора Борисовича Сочавы. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2005. С. 42–46.
17. *Хорошев А.В., Алещенко Г.М.* Характерное пространство межкомпонентных отношений в ландшафте // Вест. Моск. ун-та, Серия 5. География. 2007. № 1. С. 22–27.
18. *Хорошев А.В., Алещенко Г.М.* Методы выделения геосистем с единством межкомпонентных отношений // География и природные ресурсы. 2008. №3. С. 120–126.
19. *Хорошев А.В., Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н.* Современное состояние ландшафтной экологии // Изв.РАН. Сер. геогр. 2006. № 5. С. 12–21.
20. *Чистяков К.В.* Географический детерминизм и ландшафтный прогноз // Ландшафтоведение: теория, методы, региональные исследования, практика. Материалы XI Международной ландшафтной конференции. М.: Изд-во Географического ф-та МГУ, 2006. С. 25–29.
21. *Allen T.F.H. and Starr T. B.* Hierarchy: Perspective for Ecological Complexity. Univ. Chicago Press, 1982. 310 p.
22. *Burnett C., Blaschke T.* A multi-scale segmentation/object relationship modeling methodology for landscape analysis // *Ecolog. modeling*. 2003. V. 168. P. 233–249.
23. *Dynamic plan ecology: the spectrum of vegetation change in space and time // Quaternary. Sci. Rev.* 1983. V. 1. P. 153–175.
24. *Hay G.J., Marceau D.J., Dube P., Bouchard A.* A multiscale framework for landscape analysis:

- Object-specific analysis and upscaling // *Landscape Ecology* V. 16. 2001. P. 471–490.
25. *Hlasny T.* Probabilistic approaches to ecological modeling // *Ecolog. (Bratislava)*. 2006. V. 25. Supplement 1/2006. P. 66–75.
26. *Marceau D.J.* The scale issue in social and natural sciences // *Canadian J. Remote Sensing*. 1999. V. 25. No. 4. P. 347–356.
27. *Meentemeyer V.* Geographical perspectives of space, time, scale // *Landscape Ecol.* 1989. V. 3. No. 3/4. P. 163–173.
28. *Naveh Z.* What is holistic landscape ecology // *Landscape and Urban Planning*. V. 50. 2000. P. 7–26.
29. *O'Neill, R. V., De Angelis D.L., Waids J.B., Allen T.F.H.* A hierarchical concept of ecosystem. Univ. Princeton Press? 1986. 262 p.
30. *Openshaw S.* A geographical solution to scale and aggregation problem in region building, partitioning and spatial modelling // *Institute of British Geographers, Transactions, New Series*. 1977. V. 2. P. 459–472.
31. *Turner M., Gardner R.H., O'Neill R.V.* *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Springer Verlag. 2001. 352 p.
32. *Wu J., David J.L.* A spatially explicit hierarchical approach to modelling complex ecological systems: theory and applications // *Ecolog. modelling*. 2002. V. 153. P. 7–26.

## Polyscaled Organization of Intercomponent Relations in the Landscape

A.V. Khoroshev, K.A. Merekalova, G.M. Aleshenko

*Moscow State University*

Approach for revealing hierarchic levels of the landscape organization with use of multiscale analyses of intercomponent relations is stated. By sorting off different combinations of spatial resolution and areal scope and construction of statistic models of intercomponental relations “resonance” combinations of the scale parameters, when displaced coordinated changes of large quality of characteristics is displaced. According to received parameters of the model the dominating factor of organization for the corresponding hierarchic level is revealed. Under this approach the hierarchic levels doesn't given strictly on condition of the one leading component, but revealed on the base of intercomponent relations, i.e. revealed immediately integral landscape structures. Excess combinations of the scale parameters permits to fix “resonance” combinations, which indicate objectively existed intercomponental relations, submitted to the common factor of formation of the spatial differentiation. Method is illustrated on example of mean tonnage research polygon in Archangelsk region on facial and stow level.