

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.52 + 551.509.25 + 574.4

DOI: 10.15372/GIPR20230113

Э.Г. КОЛОМЫЦ*, А.К. ЧЕРКАШИН**

*Пушкинский научный центр РАН, Институт фундаментальных проблем биологии,
142290, Пушкино, ул. Институтская, 2, Россия, egk2000@mail.ru

**Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033, Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 1, Россия, akcherk@irnok.net

ПОЛИСИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЗОНАЛЬНЫХ ГЕОПРОСТРАНСТВ СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ РУССКОЙ РАВНИНЫ

Процедуры полисистемного анализа раскрываются в единстве математического, статистического и логического методов обработки пространственных данных для изучения ландшафтно-зонального геопространства на примере территории Волжского бассейна. Авторы исходят из концептуального положения Л.С. Берга о зональной обусловленности особенностей географического ландшафта, что выражается в соотношении фоновых (зональных) условий и местных (азональных) факторов и характеристик природных компонентов, взаимодействие которых объединяет их в ландшафтное и зональное целое. На основе картографических материалов выявлены региональные особенности влияния географической среды на формирование ареалов групп видов ландшафтов на территории и в системе факторальных пространств и полей с пространственным каркасом организации ландшафтных геосистем. Методология полисистемного анализа базируется на процедурах расслоения целостного образования на множество непересекающихся системных слоев (моносистем), изучение каждого из которых осуществляется независимо с помощью специальных методов конкретных теорий, которые моделируют земную реальность в специальных терминах. Выделены три слоя-типа теоретического объяснения связности групп видов ландшафтов: функциональная модель связи «признак–признак», модель объектно-типологической дифференциации территории «объект–объект» и кластерная таксономическая модель «объект–признак». Основываясь на математических соотношениях, определены функции фоновых, каркасных, ландшафтно-типологических и процессных составляющих территориального многообразия природной среды.

Ключевые слова: ландшафтно-зональное геопространство, факторально-признаковое пространство, полисистемное расслоение, модели ландшафтной организации, типы ландшафтных связей, территория Волжского бассейна.

E.G. KOLOMYTS*, A.K. CHERKASHIN**

*Pushchino Science Center, Russian Academy of Sciences, Institute of Basic Biological Problems,
142290, Pushchino, ul. Institutsкая, 2, Russia, egk2000@mail.ru

**V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, akcherk@irnok.net

POLYSYSTEM ANALYSIS OF ZONAL GEOSPACES FOR THE MIDDLE ZONE OF THE RUSSIAN PLAIN

Polysystem analysis procedures are revealed in the unity of mathematical, statistical and logical methods of spatial data processing for studying landscape-zonal geospace by using the Volga basin territory as an example. We proceed from L.S. Berg's conceptual position about the zonal conditionality of the features of the geographical landscape, which is expressed in the ratio of background (zonal) conditions and local (zonal) factors and characteristics of natural components, the interaction of which unites them into a landscape and zonal whole. On the basis of cartographic material, regional features of the influence of the geographic environment on the formation of the areas of groups of landscape species on the territory and in the system of factor spaces and fields with a spatial framework of the organization of landscape geosystems are revealed. The methodology of polysys-

tem analysis is based on the procedures of stratification of holistic formation into many non-intersecting system layers (monosystems), the study of each of which is carried out independently by special methods of specific theories that model earthly reality in special terms. Three layers-types of a theoretical explanation of the connectivity of groups of landscape species have been identified: a functional model of the "attribute–attribute" relationship, a model of object–typological differentiation of the "object–object" territory, and a cluster taxonomic "object–attribute" model. Based on mathematical relationships, the functions of background, frame, landscape–typological and process components of the territorial diversity of the natural environment are determined.

Keywords: Landscape-zonal geospace, factor–attribute space, polysystem stratification, models of the landscape organization, types of landscape connections, territory of the Volga basin.

Географическое пространство обычно трактуется как анизотропное пространство биogeосферы, состоящее из сети ареалов различных хронологических и типологических единиц, разделенных границами и обладающих определенными свойствами и многоканальными территориальными связями — как внутренними, так и внешними [1–4]. В учении о геопространстве центральное место занимает выдвинутая В.В. Докучаевым [5, 6], а затем развитая и обоснованная А.А. Григорьевым [7], концепция о целостности и неразрывности географической среды, получившая полное воплощение в теории географической зональности. Л.С. Берг [8] охарактеризовал географические зоны как ландшафтные, подчеркнув единство понятий «ландшафт» и «природная зона».

Цель данной статьи — представить результаты изучения влияния гидроклиматических факторов на дифференциацию низших региональных единиц — ландшафтов [9] как элементов зональных геопространств, а также выявить территориальную и факторальную организацию ландшафтов.

Исследование проведено на примере ансамбля природных зон средней полосы Русской равнины, основную часть которой составляет Волжский бассейн.

Территория в силу своих природных особенностей традиционно была объектом изучения зональных форм организации географической среды. Объект исследования представляет собой сложное разнокачественное пространственное образование, поэтому для его изучения используются методы полисистемного анализа [10], основанного на формализованных процедурах расслоения пространств на многообразие типов этой среды [11, 12].

МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полисистемный анализ — это разновидность системного анализа; его особенность — исследование объектов как систем разного рода (полисистем, полиструктур), для изучения которых используются соответствующие системные понятия и теории [10]. Методология полисистемного анализа базируется на процедурах расслоения целостного образования на множество непересекающихся системных слоев (моносистем), изучение каждого из которых осуществляется независимо с помощью специальных моделей и методов конкретных теорий, что отражает реальность в специальных понятиях и терминах [12] для исследования, моделирования и картографирования различных геопространств.

Характеристики геопространств задаются двумя способами: географическими координатами $\xi = \{\xi_k\}$ широты ξ_1 , долготы ξ_2 и высоты ξ_3 местоположения и времени t наблюдения, а также наборами значений $x = \{x_i\}$ факторов, признаков и свойств $x_i(\xi, t)$ геосистем, которые параметризуются географическими координатами ξ и временем t и соответствующим образом отображаются на картах и в базах данных ГИС. Различные достоверные информационные представления реальности понимаются как эквивалентные. Переменные $x = \{x_i\}$ связаны разного рода функциональными соотношениями $F(x)$, которые необходимо выделить и определить индивидуально для каждой ситуации (ξ, t) , и наборов показателей $x = \{x_i\}$ геопространства. Будем различать территориальное зональное геопространство (геополе) $\Xi = (\xi, t)$ и факторное (признаковое) геопространство $x \in X$. Декартово произведение $\Xi \times X \times F$ характеризует изменчивые географические поля $\Xi \times X$ разных признаков $x_i(\xi, t)$ и геосистемных функций $F[x(\xi, t)]$. В геопространстве Ξ функция $F(x)$ соответствует, например, относительной высоте рельефа или скалярным полям и картам других показателей (оценок). В пространстве X функция $F(x)$ характеризует связи между признаками, в частности, задает кривую или поверхность потенциала геосистемной ниши в зависимости от величины влияющих факторов.

Формально расслоение — это отображение $\pi: X \rightarrow B$, обратное которому $\pi^{-1}: B \rightarrow X$ развертывает элементы $b \in B$ в пространстве X в виде множества непересекающихся слоев $Y = \{X_b\}$ (рис. 1). Так, например, происходит при типологическом и классификационном расслоении, где к множеству расслоения X относятся таксономические единицы нижнего уровня (виды), а к базе расслоения B — то же верхнего уровня (группы). Результат расслоения — это распределение $Y = \{X_b\}$ множества видов

Рис. 1. Схема расслоения признакового пространства X над локальными точками $b = F(x_0)$ сферического многообразия $B = F(x)$. Пояснения в тексте.

по группам b , в частности, деление зонального геопространства Ξ на ареалы разного типа геосистем (геомеров).

При теоретическом расслоении знаний каждый объект X представляется как множество различных систем X_b , как полисистема $Y = \{X_b\}$. Модели X_b однотипных систем b объединяются в специальную теорию T_b , в которой объект X описывается в системных характеристиках X_b этой теории b , например, теории динамических, сложных, функциональных, классификационных и других типов систем. Полностью объяснить свойства объекта возможно только в расслоенном пространстве $Y = \{X_b\}$ с разных системных позиций T_b в своеобразных координатах полисистемы теорий $T = \{T_b\}$.

Полисистемы формируются по разным основаниям (базам). Полисистема В.С. Преображенского [13] в принятых здесь терминах представляет собой гетерогенное геопространство (поле) Ξ , расслоенное на непересекающиеся ареалы $Y = \{X_b\}$ одноранговых геосистем разного типа (геомеры). Каждый геомер — это моносистема X_b межкомпонентных связей, т. е. полисистема разных компонентов $Y = \{X_b\}$ (геосистема в понимании В.Б. Сочавы [4]) и их характеристик $x = \{x_i\}$ теперь уже в пространстве факторных координат $x \in X$ геополисистемного анализа, раскрывающего географическое содержание.

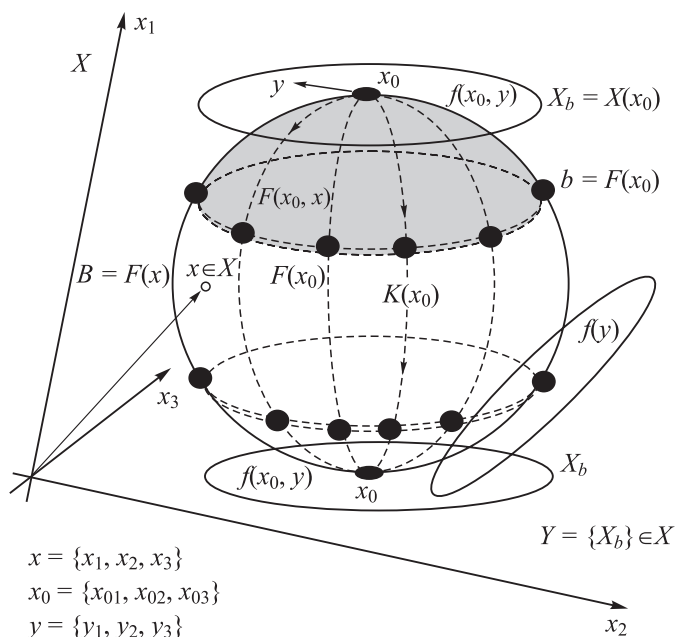
Аналитическое касательное расслоение $Y = \{X_b\}$ реализуется над многообразиями — базовыми поверхностями B , заданными непрерывной функцией $F(x)$, $x = \{x_i\} \in X$ (на рис. 1 это поверхность сферы). Касательные слои X_b пространства X над $F(x)$ в точках $b = F(x_0)$ поверхности $F(x)$ с координатами $x = x_0 = \{x_{0i}\} \in X$ представляют собой касательные плоскости $X_b = X(x_0)$ к $F(x)$ в точке $F(x_0)$. Это позволяет перейти от глобальной системы координат $x = \{x_i\}$ восприятия объекта к локальным (относительным) координатам $y = \{y_i\}$, $y_i = x_i - x_{0i}$ и функциям $f(x_0, y) = F(x) - F(x_0)$ в слое $X(x_0)$.

Уравнение плоскости задается универсальным дифференциальным уравнением [14]:

$$F(x) = f(x_0, y) + F(x_0) = \sum_i a_i y_i + F(x_0), \quad a_i = \frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial y_i}, \quad (1)$$

где $a = \{a_i\}$ — показатели чувствительности изменения функций $F(x)$ или $f(x_0, y)$ при изменении переменных x_i или y_i на единицу при постоянных значениях x_{0i} , градиент функции $F(x)$ по направлению изменения x_i и y_i . Отображение $f(x_0, y)$ из слоя на многообразие $F(x)$ дает специальную функцию $F(x_0, x) = f(x_0, y) + F(x_0)$, которая на рис. 1 соответствует затуманенной области на $F(x)$. Например, $F(x_0, x)$ — поверхность потенциала геосистемной ниши для конкретного ландшафта x_0 .

Аналогично происходит при картографировании, когда земную поверхность $F(x)$ в окрестностях опорной точки $F(x_0)$ отображают на плоскую карту $f(x_0, y)$. Обратное отображение карты $f(x_0, y)$ на поверхность дает представление $F(x_0, x)$ о ее ландшафтных свойствах. Совокупность карт в окрестностях разных точек x_0 формирует расслоенное пространство (атлас карт). Как и при картографировании, основная идея полисистемного анализа состоит в максимально точном представлении многообразия $F(x)$ множеством слоев $f(x_0, y)$ разной среды x_0 . Так, например, можно раскрыть неизвестную функцию состояния почвы В.В. Докучаева $F(x)$ от факторов почвообразования $x = \{x_i\} \in X$ факторного пространства X через функции разных местоположений $F(x_0, x)$. Подобным же образом в концепции Л.С. Берга [8] особенности географического ландшафта $F(x_0, x)$ обусловлены влиянием фоновых (зональных) условий $F(x_0)$ и местных (азональных) $f(x_0, y)$ факторов y . Взаимодействие разных ландшафтов $f(x_0, y)$ безотносительно к средовому окружению объединяет их в зональное целое (территориальный комплекс).



Решения уравнения (1) — это бесконечное множество однородных функций $f(x_0, y) = f(y)$ (уравнений Эйлера, финслеровы метрики), в частности, линейная зависимость (α_i — константы):

$$f(y) = \alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2 + \dots + \alpha_i y_i + \dots + \alpha_n y_n. \quad (2)$$

К таким функциям также относится формула расчета евклидовой метрики с весовыми коэффициентами α_i :

$$f(x_0, y) = \sqrt{\sum_i \alpha_i y_i^2}, \quad a_i = \frac{\partial f}{\partial y_i} = \alpha_i y_i / \sqrt{\sum_i \alpha_i y_i^2}. \quad (3)$$

Локальные интерпретации $f(x_0, y)$ восприятия объекта $F(x)$ в каждом слое функционально подобны, а в глобальной системе представления отличаются на индивидуальную характеристику местоположения (среды) $F(x_0)$: $F(x) = f(x_0, y) + F(x_0)$. Дискретные точки многообразия $F(x_0)$ организуются в сети $K(x_0)$ на поверхности $F(x)$ в виде ориентированных или неориентированных графов (см. рис. 1). Выявление этих графических сетей — одна из основных задач полисистемного анализа структуры и функции послойной связи $f(x_0, y)$ в данном исследовании. Вид функции $f(x_0, y)$ для анализа зависит от постановки задачи и соответствующего теоретического направления ее решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Средняя полоса Русской равнины, определяемая как бореальный экотон [15], представляет собой обширную зону перехода от бореального пояса к суббореальному. В пределах основного водосбора Волжского бассейна она охватывает среднюю и южную тайгу, подтайгу, лесостепь и северную степь. Основу бореального экотона образует Главный ландшафтный рубеж Русской равнины [16], проходящий по речным долинам Оки, Волги и Камы и отделяющий подтаежную зону от зоны лесостепи с выраженным переходом показателя соотношения тепла и влаги через значение 1.

Методом ортогональных сеток исходная информация снималась с ландшафтной карты В.П. Юниной в м-бе 1:2 500 000 и с 25 самостоятельно созданных карт ландшафтно-геофизических условий основного водосбора Волжского бассейна и его окружения [15]. Расстояние между узлами сетки выбрано меньше размеров ландшафтного контура на карте, в итоге покрытой 1467 точками. Использовались также опубликованные и фондовые картографические материалы [15].

На ландшафтной карте представлены контуры 67 видов ландшафтов, которые различаются по зональным и а зональным (геоморфологическим) признакам [9]. Виды ландшафтов объединены в группы ландшафтов (ГЛ), в понимании В.А. Николаева [17], т. е. региональные таксономические единицы в составе классов и типов ландшафтов, образующие пространственную систему геохимических сопряжений [15]. Это позволяет сблизить контуры проявления таксономических рангов ландшафтов с контурами соответствующих рангов растительного и почвенного покровов. Выделена 21 таксономическая единица типологических групп ландшафтов (рис. 2).

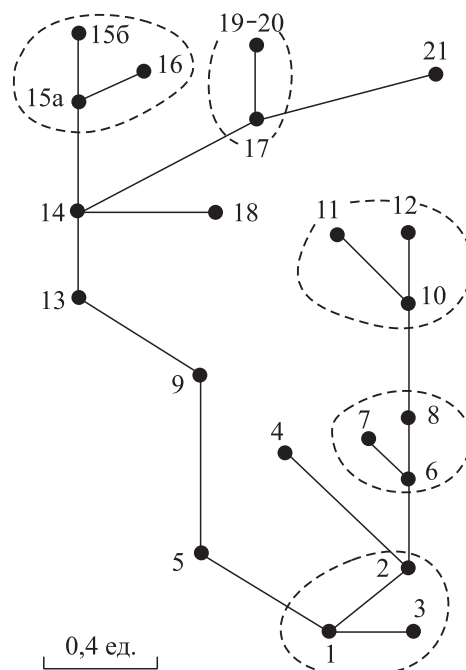
Обработка информации проводилась с помощью трех статистических методов, отражающих три типа (слоя) представления теоретических знаний. Первая теоретико-информационная (функциональная) модель [18] описывает связь характеристик геокомпонентов $x = \{x_i\} \in X$, с выделением по общему принципу $f(x_0, y)$ множества геосистемных ниш $F(x_0, x) = f(x_0, y) + F(x_0)$ групп ландшафтов в факторном пространстве $x \in X$. Вторая теоретико-множественная модель [16] отражает форму $F(x_0)$ объектно-типологического расслоения территории Ξ с выделением ее ландшафтной организации через сравнение геосистемных ниш ГЛ с расчетом различных мер их сходства и включения. Третья кластерная (таксономическая) модель [19, 20] представляет структуру ландшафтно-зональных связей.

Многомерный ландшафтный анализ зонального геопространства Русской равнины проводился в рамках концепции существования природно-территориальной организации в форме модели природного комплекса как системы связей «фон–каркас–процесс–узор» [21]. Территориальное многообразие $F(x)$ природной среды представлено функциями зонального фона $F(x_0)$ с пространственным каркасом $K(x_0)$ структурной связи разных позиций $F(x_0)$, порождающих расслоенное пространство ландшафтного узора (эпигенетической структуры) $F(x_0, x) = f(x_0, y) + F(x_0)$ по узлам $F(x_0)$ каркаса $K(x_0)$ конкретных условий среды x_0 . Физико-географический фон $F(x_0)$ характеризует базовую природно-территориальную организацию $F = \{F(x_0, x)\}$. Фоновая функция $F(x_0, x)$ — это функция непрерывного распределения признаков x ландшафта x_0 . Каркас ландшафта $K(x_0)$ на территории Ξ — пространственно протяженные и наименее изменчивые (устойчивые) во времени структурно-функциональные

Рис. 2. Граф-дерево минимального расстояния между группами ландшафтов Волжского бассейна в пространстве 25 ландшафтно-геофизических признаков (см. таблицу) с указанием масштабной линейки расстояния 0–0,40 усл. ед. Пояснения в тексте.

Типы местоположений: Э — элювиальный, ТЭ — трансэлювиальный, Т — транзитный, ТА — трансаккумулятивный, А — аккумулятивный.

Группы ландшафтов по зонам и подзонам. Средняя тайга: 1 — эрозионно-денудационные и денудационно-зандровые, Э, пихтово-еловые и елово-сосновые; 2 — моренные и моренно-зандровые, Э и Т, пихтово-елово-сосновые и сосновые; 3 — зандровые, ТА, елово-сосновые и сосновые; 4 — озерно-ледниковые и долинно-зандровые, еловые и сосновые. Южная тайга: 5 — эрозионно-денудационные, Э, пихтово-еловые; 6 — моренные и озерно-ледниковые, Э и ТЭ, еловые и елово-сосновые; 7 — денудационно- и моренно-зандровые, Т, пихтово-еловые; 8 — зандровые и долинно-зандровые, ТА и А, елово-сосновые. Смешанные леса: 9 — эрозионно-денудационные, Э и ТЭ, широколиственно-пихтово-еловые и дубово-липовые; 10 — моренные и озерно-ледниковые, Э и ТА, еловые и елово-сосновые; 11 — денудационно- и моренно-зандровые, Т, пихтово-еловые и елово-сосновые; 12 — зандровые и долинно-зандровые, ТА и А, сосновые и елово-сосновые. Широколиственные леса: 13 — эрозионно-денудационные, Э, ясеневое-дубово-липовые и сосново-дубовые; 14 — эрозионно-денудационные, Э и ТЭ, дубово-липовые и ясеневое-липово-дубовые; 15а — эрозионные и озерно-ледниковые, Т, дубово-липовые и сосново-широколиственные; 15б — денудационно- и моренно-зандровые, Т, хвойно-широколиственные и сосновые; 16 — зандровые и долинно-зандровые, ТА и А, широколиственно-хвойные и сосновые. Средняя и южная лесостепь: 17 — эрозионно-денудационные, Э и ТЭ, ясеневое-липово-дубовые с луговыми степями; 18 — эрозионные и «сыртовые», ТЭ и Э, луговостепные с липово-дубовыми лесами; 19, 20 — озерно-ледниковые и древнеаллювиальные, Т и А, лугово-степные, широколиственно-сосновые. Северная степь: 21 — эрозионно-денудационные, «сыртовые» и древнеаллювиальные, ТЭ и ТА, разнотравно-типчаково-ковыльные.



элементы разных уровней территориальной организации геосистем, разветвленная сеть переноса вещества, энергии и информации по градиентам направленности $a = \{a_i\}$ с узлами и линиями изменения ориентации геопотоков (см. рис. 1). Ландшафтный узор — это ландшафтно-типологическая дифференциация (расслоение) зонального геополя Ξ на базе территориального и факторального каркаса $K(x_0)$. Геополя и геопотоки в условиях физико-географического фона $F(x_0)$ и существующего каркаса $K(x_0)$ формируют процессор (оператор) $f(x_0, y)$; его свойства, согласно уравнению (1), определяются факторами $y = \{y_i\}$ и направлениями $a = \{a_i\}$ ландшафтообразующего действия.

Формализованные понятия связаны следующими отношениями включения (см. рис. 1): $x_0 \in x \in X$, $F(x_0) \subset K(x_0) \subset F(x) \subset X$, $F(x_0, x) \subset F(x) \subset X$, $f(x_0, y) = F(x_0, x) \subset F(x)$, $f(x_0, y) \subset X$.

ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В ландшафтно-зональном геопространстве Ξ каждый геокомпонент x_i рассматривается в системе «фон–каркас–процесс–узор», где фон $F(x_0)$ и каркас $K(x_0)$ с процессором $f(x_0, y)$ (связи геопотоками) относятся к входным переменным, а на выходе появляются характеристики ГЛ $F(x_0, x) = f(x_0, y) + F(x_0)$, формирующие ареальный узор. Все геокомпонентные признаки $x = \{x_i\}$ распределены по блокам системной модели $F(x)$ природной среды (см. таблицу).

Рассчитываются две меры $F(x_0, x)$ пространственных связей типологической группы ландшафтов x_0 и факторов x в долях 1: нормированный коэффициент сопряженности $K(A; B)$ и коэффициент приема информации $K(B/A)$ [18]. Информационно-картографический анализ пространственной сопряженности $F(x_0, x)$ выявил ведущую роль первичных входных (фоново-каркасных), а также процессорных вещественно-энергетических признаков, определяющих внутризональную дифференциацию Русской равнины (см. таблицу). В качестве независимых входных переменных приняты: годовая суммарная радиация (x_1), годовая сумма осадков (x_{15}), типы морфоструктур и морфоскульптур (x_0) и механический состав почвообразующих пород (x_{12}). Зависимость встречаемости $F(x)$ площадей ГЛ по

**Информационные показатели $K(A; B)$ и $K(B/A)$ связей групп ландшафтов
с геокомпонентными признаками различных блоков модели региональных природных комплексов**

Геокомпонентный признак		Параметры связей	
номер признака	наименование признака		
Блок «Физико-географический фон и ландшафтный каркас»		$K(A; B)$	$K(B/A)$
1	Годовая суммарная радиация	0,120	0,238
2	Средняя температура января	0,085	0,224
3	Коэффициент зимней континентальности Полозовой	0,168	0,357
4	Годовой поверхностный сток	0,145	0,350
5	Максимальная высота снежного покрова	0,099	0,251
6	Снежно-температурный коэффициент Рихтера	0,104	0,267
7	Коэффициент снежности Осокина	0,202	0,251
8	Типы морфоструктур	0,199	0,273
9	Морфоструктура и морфоскульптура	0,140	0,321
10	Ступени абсолютных высот	0,174	0,200
11	Современные тектонические движения	0,067	0,176
12	Механический состав почвообразующих пород	0,125	0,183
13	Роды ландшафтов	0,249	0,321
Блок «Каркас–процессор»			
14	Годовой радиационный баланс	0,166	0,343
15	Годовая сумма осадков	0,122	0,298
16	Годовой подземный сток	0,183	0,395
17	Коэффициент стока	0,129	0,295
18	Глубина залегания грунтовых вод	0,274	0,275
19	Литология и влажность грунтов	0,175	0,253
Блок «Процессор (внутренние геопотоки)»			
20	Средняя температур июля	0,187	0,379
21	Сумма биологически активных температур	0,206	0,404
22	Годовая испаряемость	0,210	0,362
23	Сумма осадков теплого периода	0,140	0,317
24	Летние запасы влаги в почве	0,296	0,303
25	Радиационный индекс сухости Будыко	0,162	0,361
26	Коэффициент увлажнения Высоцкого–Иванова	0,169	0,376
27	Гидротермический коэффициент Селянинова	0,184	0,379
28	Первичная биопродуктивность	0,081	0,166
Блок «Ландшафтный узор»			
29	Группа видов почв	0,125	0,309
30	Химический состав грунтовых вод	0,183	0,212
31	Почвенно-геохимические комплексы	0,142	0,379

всем зонам Волжского бассейна от входных переменных x выражается, согласно [18], линейными уравнениями вида (1) и (4):

$$F(x) = 0,24x_1 + 0,30x_{15} + 0,32x_9 + 0,12x_{12} + 0,02x_0. \quad (4)$$

Здесь коэффициенты $a = \{a_i\}$ при переменных $x = \{x_i\}$ — показатели приема информации. Коэффициенты a нормированы, так что их сумма, включая коэффициент при неизвестном аргументе x_0 ($F(x_0) = 0,02x_0$), равна 1. Как видно из уравнения (4), встречаемость ареалов групп ландшафтов борельского экотона в основном определяется влиянием четырех факторов: x_1 , x_9 , x_{12} и x_{15} .

Функцию $F(x_0, x)$ полезно также использовать в качестве меры сходства двух групп ландшафтов (ГЛ) с характеристиками $x = \{x_i\}$ и $x_0 = \{x_{0i}\}$ в пространстве ландшафтно-геофизических факторов X , — например, для расчета расстояний в геопространстве X между ГЛ по методу «вроцлавской таксономии» [20]. Таблица распределения значений факторов (суммарной радиации, радиационного баланса, средней температуры июля и т. д.) формировалась по площади ареалов 21 группы ландшафтов. С каждой ячейкой таблицы связана норма значений фактора (модальная величина), свойственная

данной ГЛ. Затем все данные центрировались относительно нормы и нормировались по среднеквадратическим отклонениям признаков $x = \{x_i\}$ по всем ГЛ. Наконец, с использованием метрики (3) с весовыми коэффициентами $\alpha = \{\alpha_i\}$ рассчитывались таксономические расстояния $f(x_0, y)$, $y_i = x_i - x_{0i}$ между парами ГЛ по всем факторам x_0 и x .

Метрическая функция $f(x_0, y)$ одного слоя соответствует расстоянию между фиксированными ГЛ с индексом слоя x_0 и остальными x ГЛ. Структура слоя (моносистемы) в пространстве X представляется в виде графа-звезды — связанного двудольного графа, в котором все ребра исходят из одной вершины x_0 . Длина ребра соответствует мере $f(x_0, y)$; графически в проекции на плоскость учитываются ребра с наименьшими значениями, указывающие на высокую связность (факторную близость и однородность). Любой плоский граф вокруг каждой вершины может быть расслоен на подграфы-звезды (полисистему) и собран из них в определенной последовательности в топологическую структуру каркаса $K(x_0)$.

По минимальным расстояниям построен граф-дерево связи $f(x_0, y)$ между парами ГЛ (см. рис. 2). В основании графа находится группа (плеяда, звезда, моносистема) среднетаежных геосистем (1–3), охватывающая почти все ландшафтное разнообразие подзоны средней тайги: эрозионно-денудационные, моренные, денудационно- и моренно-зандровые пихто-ельники и сосняки на элювиальных, транзитных и трансэлювиальных местоположениях. От среднетаежной плеяды отходят две ветви сходства, различающиеся по генетическим типам рельефа и соответствующие родам ландшафтов. Левая ветвь отображает трансзональную последовательность групп ГЛ (1–5–9–13, 14–18–19, см. рис. 2) с большими таксономическими расстояниями. Это водораздельные природные комплексы, которые пересекают весь бореальный экотон от средней тайги (1) через южную тайгу (5) и подтайгу (9), далее к широколиственным лесам (13, 14) и, наконец, к лесостепи (18) и северной степи (21) (см. рис. 2). Правая ветвь графа соответствует речным долинам и склонам междуречий. В отличие от водораздельной серии, она имеет меньшие таксономические расстояния между ГЛ, что указывает на более высокую однородность климатических условий существования геосистем низменных равнин и речных долин по сравнению с приводораздельными геосистемами.

Топологическая структура $K(x_0)$ многообразия в X повторяется в структуре пространственной сопряженности ландшафтов в территориальном геопространстве Ξ . Прослеживаются два пространства: водораздельное и низменно-долинное, различающиеся по структуре трансзональных геопространств, что отражает на Русской равнине явления прямой и обратной вертикальной дифференциации ландшафтов [16].

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ

Качественная определенность ГЛ (и в особенности размещения ξ ареалов) определяются их геокомпонентными признаками $x = \{x_i\}$ и показателями групповой однородности $f(x_0, y)$ [21]. Степень контактности в геопространстве Ξ выражается мерой $f(x_0, y)$ тесноты связи признаков $x(\xi) \in X$ различных геокомпонентов x_i . 31 признак x_i сгруппирован в семь блоков (см. таблицу), которые на входе геосистемы характеризуют приземную атмосферу, континентальную гидросферу и поверхностную литосферу, а на выходе — первичную биопродуктивность и состояние почвенно-геохимических комплексов [19].

Составлялась таблица частот совместной встречаемости P_{ijk} разных градаций (k) пар признаков x_{ik} и x_{jk} и рассчитывались показатели $f(x_0, y)$ их парного сочетания [18], где разность $y_i = x_i - x_j$ формально соответствует множеству значений парных сочетаний градаций признаков P_{ijk} . По величине $f(x_0, y)$ выделено семь классов эквивалентности структурно-функциональных блоков в ландшафтах Волжского бассейна, построены кластерные модели геокомпонентных структур всего бореального экотона и его зональных подразделений (рис. 3). На графе кластер-дендрограммы выделяются пять основных кластеров, учитывающих только три первых уровня эквивалентности. Здесь, как во всякой иерархической классификации, моносистемы представляют собой группы элементов (кластеры), связанные с одним элементом вышестоящего уровня, а полисистемы — все кластеры одного уровня эквивалентности. Полисистемы графически выделяются расслоением (слоениями) по расчетным значениям показателя $f(x_0, y) = \text{const}$ в виде вложенных изолиний рельефной поверхности этого показателя.

На самых высоких уровнях III–V параметрического пространства X бореального экотона Русской равнины проявляются пять кластеров природных зон: a, b, c, d, e (см. рис. 3). Существенны связи гидроклиматических факторов (a), которые вносят приоритетный вклад в разнообразие ландшафтов

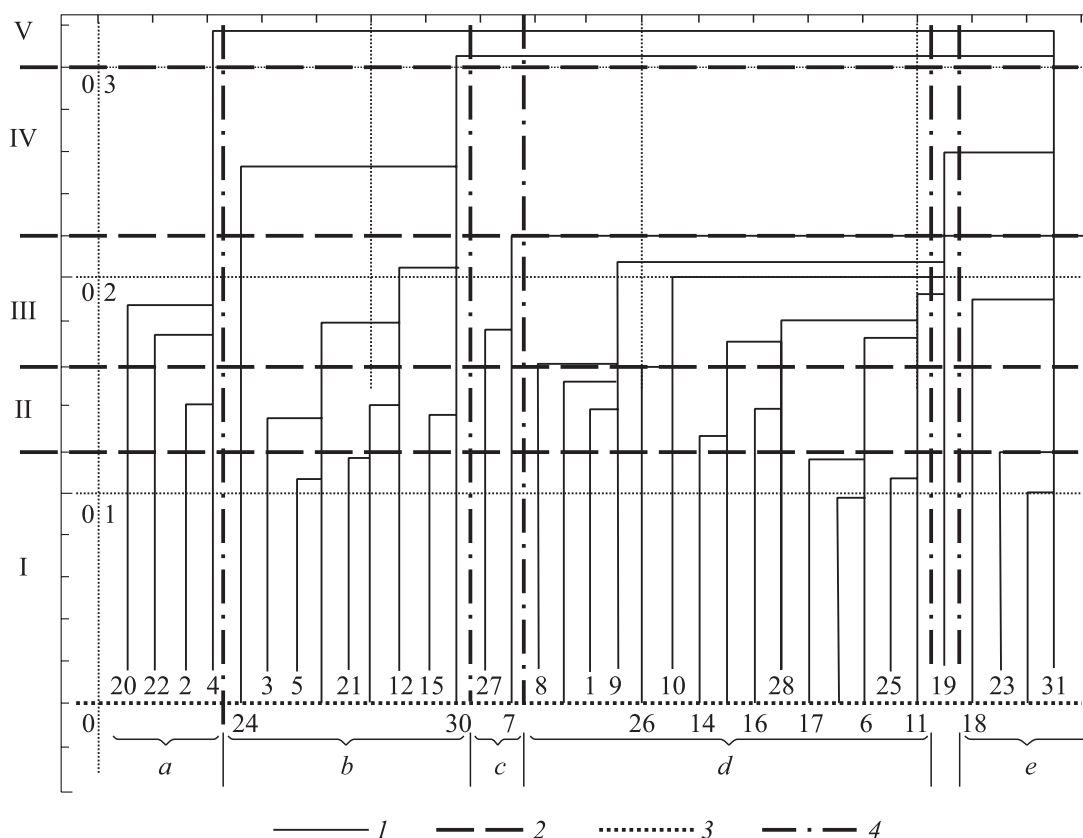


Рис. 3. Кластер-дендрограмма тесноты связей между ландшафтообразующими признаками (см. таблицу) по всему бореальному экотону.

1 — вертикальные ветви кластеров для признаков 1–31; 2 — границы уровней I–V эквивалентности признаков; 3 — границы градаций евклидова расстояния 0–0,1–0,2–0,3; 4 — вертикальные границы основных кластеров a–e.

зональных геопространств Ξ . Напротив, литогенные признаки (b) не имеют достаточного количества существенных перекрестных взаимосвязей $f(x_0, y)$, поэтому не обеспечивают подобного разнообразия.

ТИПОЛОГИЯ ЛАНДШАФТОВ

В теории множеств сходство множеств A и C определяется через операции их объединения $A \cup C$, пересечения $A \cap C$ и включения $A \supset C$, что соответствуют логическим отношениям «или», «и», «следует».

Теоретико-множественное типологическое расслоение ландшафтно-зонального геопространства Ξ Волжского бассейна проведено по шести блокам геопространства X признаков ландшафтов. Выполнено моделирование сначала связи ГЛ как однородных единиц, а затем с дифференциацией зональных геопространств Ξ с выделением ландшафтной структуры. Оценивались бинарные несимметричные отношения связности $f(x_0, y) \neq f(x, -y)$ групп ландшафтов — меры сходства и включения на множествах градаций факторов $x = \{x_j\} \in X$ их формирования [22].

На графах сходства (рис. 4) пунктирными линиями разделены корреляционные плеяды ландшафтных объединений, в которых $f(x_0, y)$ превышает пороговые значения однородности. Плеяды — это множество ГЛ, в которых их внутренние связи превышают внешние, т. е. это слои с нечеткими, пересекающимися границами, что соответствует неполному расслоению или наличию функционального подобия слоев в комплексах. Отчетливо выражена климатическая граница между бореальным и суббореальным поясами (рис. 4, a). Лесостепь вместе с широколиственными лесами менее однородна, чем средняя и южная тайга и подтайга. По сумме биологически активных температур (см. рис. 4, б), годовой испаряемости и радиационному индексу сухости множество ГЛ уже на первом уровне сходства разбивается на пять зональных подтипов с четким обособлением средней и южной лесостепи. Резкий

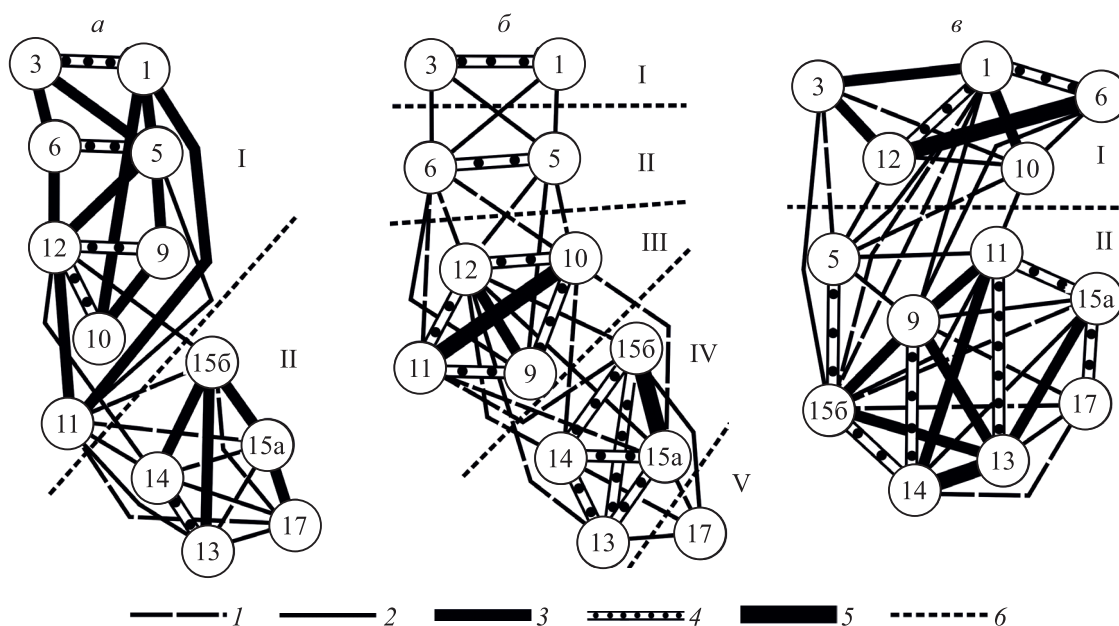


Рис. 4. Корреляционные плеяды групп ландшафтов в их зависимости от годового радиационного баланса (а), суммы биологически активных температур (б) и годового количества осадков (в).

Номера групп ландшафтов — см. рис. 2. Градации меры сходства: 1 — 0,01–0,20; 2 — 0,21–0,40; 3 — 0,41–0,60; 4 — 0,61–0,80; 5 — 0,81–0,100; 6 — границы между плеядами первого уровня сходства. I–V — корреляционные плеяды.

переход прослеживается на границе южной тайги и смешанных лесов. Эту границу, по-видимому, следует считать основным климатическим рубежом между бореальным и суббореальным поясами. Годовое количество осадков обеспечивает лишь «размытую» дифференциацию зональных геопространств (см. рис. 4, в).

В теоретико-множественной модели ландшафтно-типологической организации природных зон (подзон) Волжского бассейна по фактору средней июльской температуры (рис. 5) отчетливо виден резкий контраст в отношении включения ГЛ между средней и южной тайгой, с одной стороны, и смешанными лесами — с другой. Таежные геосистемы имеют значительные пересечения функциональных ниш, т. е. высокую повторяемость в пространстве одних и тех же термических условий летнего сезона. Судя по количеству и «весу» входных стрелок (ребер ориентированного графа), наибольшим разнообразием по фактору средней июльской температуры отличаются: ГЛ 2 и ГЛ 3 в подзоне средней тайги (моренные и зандровые пихто-ельники и сосняки), ГЛ 5 группы эрозионно-денудационных ландшафтов в южнотаежной подзоне. Наименее разнообразны среднетаежные эрозионно-денудационные и денудационно-зандровые пихто-ельники и сосняки (ГЛ 1) с максимальным числом и «весом» выходных стрелок.

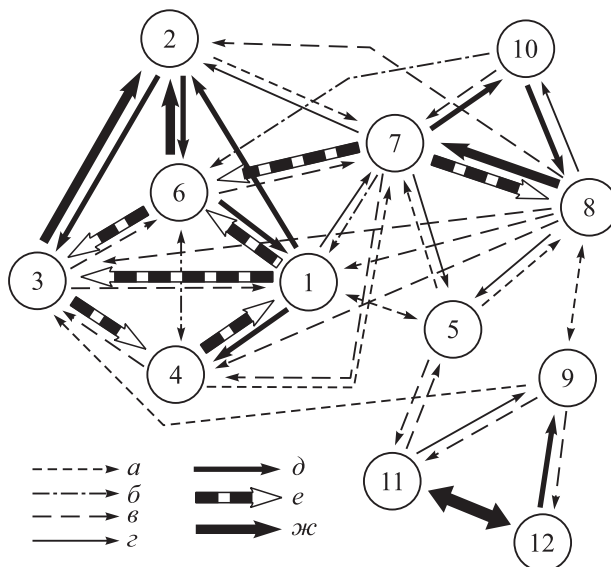


Рис. 5. Ориентированный граф отношений включения групп ландшафтов таежной и подтаежной зон по признаку средней температуры июля.

Номера групп ландшафтов — см. рис. 2. Мера включения: а — не больше 0,30; б — 0,31–0,40; в — 0,41–0,50; г — 0,51–0,60; д — 0,61–0,70; е — 0,71–0,80; жс — 0,81–0,92.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полисистемный анализ представляет собой разновидность системного анализа — исследование объектов как систем разного рода (полисистем), основанного на процедурах расслоения (дифференциации) целостного образования на множество непересекающихся системных слоев (моносистем) для изучения их моделями и методами специальных теорий. Методы полисистемного анализа результатов статистической обработки пространственно-картографических данных по территории средней полосы Русской равнины использованы для иллюстрации положения о единстве природной зональности и ландшафтной дифференциации по типам природной среды, сочетающим зональные и аazonальные признаки геосистем (геомеров).

Выделены три слоя-типа теоретического объяснения связности групп видов ландшафтов: функциональная модель связи «признак—признак», модель объектно-типологической дифференциации территории «объект—объект» и кластерная таксономическая модель «объект—признак». На основе математических соотношений определены функции фоновых, каркасных, ландшафтно-типологических и процессных составляющих территориального многообразия природной среды.

Статистический анализ осуществлен по данным двух типов геопространств: географического поля и факторного (признакового) пространства. В этих пространствах, соответственно, выделяются полисистема гомогенных ареалов (геомеров — групп ландшафтов) и полисистема слоев (моносистем) связи каждого геомера или геокомпонента со всеми остальными. В результате восстанавливается сеть (каркас) многообразия связи ландшафтов и факторов.

Впервые дана интерпретация послойной функции факторного воздействия в разных математических формулах, выражающих парные количественные и качественные взаимосвязи: евклидовое расстояние, частота совместной встречаемости, мера сходства множеств градаций признаков. В результате раскрыты причинно-следственные связи между ландшафтами и факторами ландшафтообразования, которые объединяют их в территориальное целое. Выявлено региональное разнообразие зональных форм организации географической среды и соответствующее многообразие дискретных природно-территориальных образований (ландшафтов) в системе гидроклиматических полей в виде пространственного и функционального каркаса ландшафтных комплексов.

Полисистемное моделирование природных комплексов ландшафтно-зонального уровня позволяет на основе разных показателей определить вклад различных факторов в ландшафтную организацию зонального геопространства, оценить чувствительность к их возможным изменениям. Широкая трактовка оценочных показателей дает возможность усовершенствовать методологию полисистемного расслоения с применением универсальных уравнений обработки пространственных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бунге В. Теоретическая география. — М.: Прогресс, 1967. — 279 с.
2. Гохман В.М., Гуревич Б.Л., Саушкин Ю.Г. Проблемы метагеографии // Вопросы географии. — 1968. — Вып. 78. — С. 3–14.
3. Родоман Б.Б. Территориальные ареалы и сети. Очерки теоретической географии. — Смоленск: Ойкумена, 1999. — 256 с.
4. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 319 с.
5. Докучаев В.В. О законности известного географического распределения наземно-растительных почв на территории Европейской России // Тр. Санкт-Петербург. о-ва естествоиспытателей. — Т. XII, вып. 1. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. о-ва естествоиспытателей, 1881. — С. 65–66.
6. Докучаев В.В. Учение о природных зонах. — М.: Географгиз, 1948. — 63 с.
7. Григорьев А.А. Закономерности строения и развития географической среды. — М.: Мысль, 1966. — 382 с.
8. Берг Л.С. Избранные труды. Т. II. Физическая география. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. — 426 с.
9. Исаченко А.Г. Основы ландшафтоведения и физико-географическое районирование. — М.: Высшая шк., 1965. — 327 с.
10. Черкашин А.К. Полисистемное моделирование. — Новосибирск: Наука, 2005. — 280 с.
11. Черкашин А.К., Лобычева И.Ю. Теоретические модели земледования для количественного анализа глобальных пространственных данных // География и природ. ресурсы. — 2020. — № 2. — С. 32–41.
12. Черкашин А.К. Геокартографическое мышление в современной науке // Геодезия и картография. — 2020. — № 7. — С. 27–36.
13. Преображенский В.С. Беседы о современной географии. — М.: Наука, 1972. — 168 с.
14. Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2019. — № 2 (14). — С. 69–87.

15. Коломыц Э.Г. Бореальный экотон и географическая зональность. Прогнозный Атлас-монография. — М.: Наука, 2005. — 390 с.
16. Мильков Ф.Н. Физическая география: современное состояние, закономерности, проблемы. — Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1981. — 398 с.
17. Николаев В.А. Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. — 62 с.
18. Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С. Структура растительности лесной зоны СССР: Системный анализ. — М.: Наука, 1981. — 275 с.
19. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. — М.: Статистика, 1977. — 128 с.
20. Жуков В.Т., Сербенюк С.Н., Тикунов В.С. Математико-картографическое моделирование в географии. — М.: Мысль, 1980. — 224 с.
21. Коломыц Э.Г. Экспериментальная географическая экология. Записки географа-натуралиста. — М.: КМК, 2018. — 716 с.
22. Андреев В.Л. Классификационные построения в экологии и систематике. — М.: Наука, 1980. — 142 с.

Поступила в редакцию 16.08.2021

После доработки 21.12.2021

Принята к публикации 01.11.2022