

УДК 911.52+551.509.25+574.4

## МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЛАНДШАФТНО-ЗОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА (ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

© 2022 г. Э. Г. Коломыш\*

Пушинский научный центр РАН, Институт фундаментальных проблем биологии, Пушкино, Россия

\*e-mail: egk2000@mail.ru

Поступила в редакцию 31.03.2022 г.

После доработки 15.05.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Изложено численное обоснование концептуального положения отечественной географической экологии о генетическом единстве природной зоны и географического ландшафта. На основе известных методических подходов к полисистемному анализу географической среды проведены количественные оценки ландшафтной организации бореального экотона – ансамбля зональных переходов от бореального пояса к поясу суббореальному на Восточно-Европейском субконтиненте. Задача решалась с помощью эмпирико-статистических моделей ландшафтно-зональных связей. В качестве рабочего инструмента анализа использована разработанная автором кибернетическая модель природных комплексов, описывающая иерархическую систему их организации. Осуществлены три методических подхода к полисистемному анализу: 1) функциональный, с выделением структур экологических ниш ландшафтных единиц в их факторном пространстве; 2) типологический, с дифференциацией территории по группам ландшафтов и с анализом их взаимодействия; 3) иерархический, с использованием кластерных (таксономических) моделей ландшафтной классификации. Получены меры тесноты связей между различными геокомпонентами во множестве ландшафтных единиц, а по этим мерам выделены геосинэргические “ядра” параметрической гомогенности зональных геопространств. Установлены конкретные парциальные ландшафтные структуры, образованные наиболее тесно связанными геокомпонентами и определяющие “лицо” ландшафтно-зональных систем. С помощью информационного моделирования проведена дифференцированная оценка ландшафтной организации природных зон (подзон) путем операций с матрицами эквивалентности геокомпонентных блоков. По теоретико-множественным и кластерным моделям геокомплексных связей описано территориальное пространство бореального экотона и его зональных частей. На основе количественных критериев оценен вклад различных факторов в ландшафтную организацию зонального геопространства. Это позволяет определить меру чувствительности ландшафтной структуры данной территории к изменениям зонально-климатических условий, что имеет непосредственное отношение к оценкам устойчивости ландшафтно-зональных систем в меняющемся климате.

*Ключевые слова:* природная зона, бореальный экотон, региональный ландшафт, иерархическая природно-территориальная организация, геокомпоненты, эмпирико-статистическое моделирование

DOI: 10.31857/S2587556622050065

### ВВЕДЕНИЕ

В учении о географическом способе организации систем земной природы центральное место занимает выдвинутая в свое время В.В. Докучаевым (1881, 1948), а затем всесторонне развитая и теоретически обоснованная А.А. Григорьевым (1966, 1970) концепция о целостности и неразрывности географической среды, получившая наиболее полное развитие в теории географической зональности. Это концептуальное положение комплексной физической географии звучало уже в трудах А. Гумбольдта и П.Н. Савицкого. Дальней-

шее развитие оно получило также в фундаментальных работах Л.С. Берга, Г.Д. Рихтера, В.Р. Волобуева, Ф.Н. Милькова, М.И. Будыко о зональных ландшафтных комплексах и вещественно-энергетических факторах и процессах, определяющих географическую зональность. Предложенная В.В. Докучаевым концепция природной зональности превратилась в один из теоретических вариантов современной географии (Преображенский и др., 1997). Л.С. Берг (1958, с. 210) был, по-видимому, первым, кто охарактеризовал географические зоны как ландшафтные, подчеркнув глу-

бокое единство понятий “ландшафт” и “природная зона”.

Следует особо подчеркнуть тесную связь последующего совершенствования теории зональности как общепланетарного биоклиматического явления с развитием ландшафтоведения, а затем и геоэкологии, что отобразило общую тенденцию сближения географии и экологии (Сочава, 1970, 2005). Экологический подход позволил существенно расширить рамки такого, уже традиционного объекта физической географии, как природная зональность (Д.Л. Арманд, 1975; Базилевич и др., 1986). В структуре и функционировании зональных типов ландшафтов и региональных экосистем, прежде всего, в сложности строения фитобиоты и ее продуктивности, видится проявление высшей формы организации биосферы. Тем самым, создается наиболее оптимальная для биоты форма ее устойчивого функционирования (Герасимов, 1985).

Дальнейшее развитие данного направления географической (в том числе ландшафтной) экологии связано с разработкой проблем иерархии природно-территориальных образований, которая обусловлена отношениями и связями между геокомпонентами и геопотоками, с одной стороны, и пространством создающихся ими структур – с другой (Forman, 2006; Phillips, 2002; Pickett and Cadenasso, 2002). Утверждается, что *ландшафтное исследование должно быть полимасштабным*, поскольку большинство ландшафтообразующих процессов и явлений может быть понято только при анализе смежных иерархических уровней (Magseau, 1999; Turner et al., 2001; Wu and Hobbs, 2002). При этом главное внимание необходимо обратить на свойства ландшафта как пространственно-гетерогенной системы: сложность, нелинейную динамику, эмерджентность, критические состояния, самоорганизацию.

Данное направление получило существенное развитие в отечественном ландшафтоведении (Арманд, 1988; Зейдис и др., 2001; Пузаченко, 2006; и др.). При освещении *проблемы иерархии и масштаба* установлены “резонансные” сочетания масштаба межкомпонентных отношений, создающих целостные ландшафтные структуры (Хорошев и др., 2010). Разномасштабная система связей “вмещаемых” и “вмещающих” геокомпонентов прослежена на примерах бинарных отношений “рельеф (геологическое строение)–растительность” (Хорошев, 2010). В обобщающей работе (Хорошев, 2016) представлена концепция, развивающая моносистемную ландшафтную парадигму Докучаева, с построением количественных (статистических) моделей межкомпонентных связей в полимасштабном географическом пространстве и с достаточно полной ландшафтно-экологической интерпретацией этих моделей.

Раскрыты механизмы ландшафтной организации не только на различных структурных уровнях, но и связи межуровневые, характеризующие системообразующее участие геокомпонентов с различными характерными временами и соответствующей размерностью.

## СТРАТЕГИЯ НАУЧНОГО ПОИСКА

Представленные в настоящем сообщении результаты исследования механизмов формирования ландшафтно-зональных геопространств опираются на изложенные научно-методические положения современной географической экологии. Цель научного поиска состояла в установлении характера и степени влияния гидро-климатических факторов, определяющих “лицо” “вмещающих” зональных геопространств, на территориальную упорядоченность “вмещаемых” низших, согласно (Исаченко, 1965), региональных классификационных единиц – ландшафтов, выделяемых в качестве элементов этих пространств. Необходимо было выявить ландшафтообразующую роль факторов зональности, а также территориальную дифференциацию ландшафтных единиц по сочетанию определенных значений этих факторов. Следовало рассмотреть также обратную связь – иерархическую систему ландшафтообразования, которая обеспечивает определенную устойчивость зональных геопространств.

Таким образом, объект исследования представлял собой достаточно сложное географическое образование, поэтому в качестве методической основы исследования использованы предложенные А.К. Черкашиным (2005, 2020) *методические подходы к полисистемному анализу*. Изучаемая полисистема (множество ландшафтно-зональных единиц основного водосбора Волжского бассейна) расчленялась на три разнокачественных подсистемы (подмножества) – *функциональную, объектно-типологическую и иерархическую*, по каждой из которых создавались эмпирико-статистические модели ландшафтно-зональных связей. Этот подход созвучен трем известным в физической географии методическим положениям: межкомпонентной корреляции, сопряженности между геокомплексами и их соподчиненности в иерархическом ряду (Сочава, 2005).

Организация зональных геопространств тесно связана с пространством экологическим – системой координат геокомпонентных признаков, в которой формируется множество экологических ниш фитоценологических элементов природных комплексов. В данном случае использованы два из трех известных (Одум, 1975) аспектов экологической ниши: 1) пространственный, близкий к понятиям местообитания и местоположения, и 2) ресурсный (он же факторный), определяемый положением ниши объекта относительно градиентов того или

иногo вещественно-энергетического фактора (температуры, влажности и др.). Соответственно выделяется экологическое пространство двух категорий: факторное, или ресурсное (геокомпонентное) и территориальное (геокомплексное). Размещение экологических ниш биогеосистем в зональном геопространстве соответствует климатическим нишам доминирующих видов-эдификаторов и образуемых ими растительных сообществ. Различные сочетания экологических ниш ландшафтов образуют множество экологических пространств вышестоящих по рангу геосистем зонально-регионального уровня.

Исследование проведено на примере ансамбля природных зон Средней полосы Русской равнины, основную часть которой составляет Волжский бассейн. Эта территория в силу своих природных особенностей традиционно была объектом изучения зональных форм организации географической среды. На ее примере были заложены основы концепции о зональных ландшафтных комплексах и о вещественно-энергетических факторах и процессах, определяющих географическую зональность.

#### ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Средняя полоса Русской равнины, определяемая как *бореальный экотон* (Коломыц, 2005), является обширной полосой перехода от бореального пояса к суббореальному. В пределах основного водосбора Волжского бассейна она охватывает среднюю и южную тайгу, подтайгу, лесостепь и северную степь. “Сердцевину” бореального экотона образует Главный ландшафтный рубеж Русской равнины (Мильков, 1981), проходящий по речным долинам Оки–Волги–Камы и отделяющий подтаежную зону от зоны лесостепи, с резко выраженным переходом соотношения тепла и влаги через 1 (Базилевич и др., 1986).

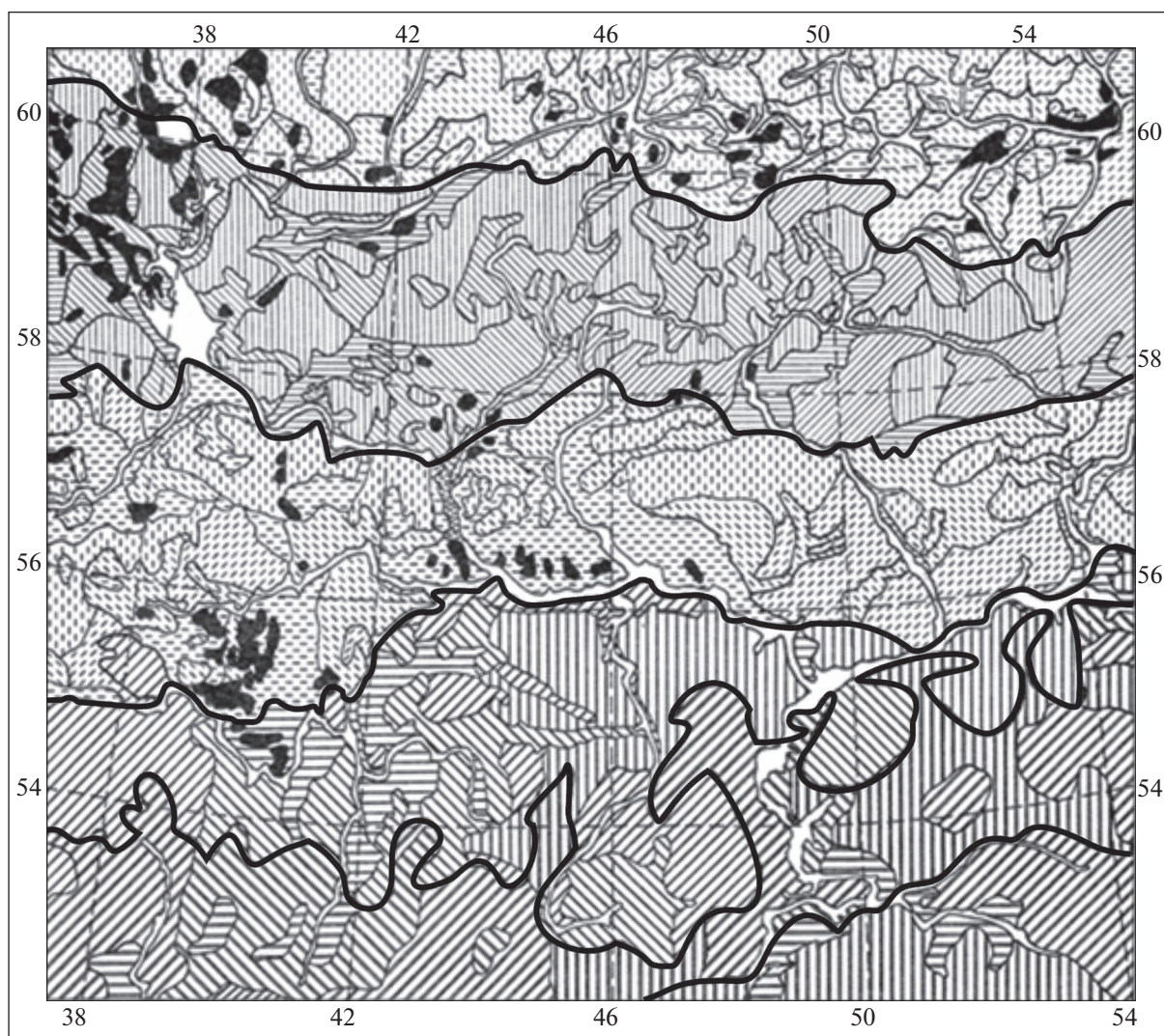
Исходная информация для анализа снималась с построенной в масштабе 1 : 2 500 000 ландшафтной карты (автор – В.П. Юнина) и 25 созданных нами карт ландшафтно-геофизических условий основного водосбора Волжского бассейна и его окружения (Коломыц, 2005). Ландшафтная карта создавалась автором на основе известных мелко-масштабных геоморфологических, почвенных и геоботанических карт, а также собственных выборочных полевых исследований. Следует отметить, что геоботанические карты 35–40-летней давности (Исаченко, Лавренко, 1974; Котова, 1987) по своему содержанию не потеряли актуальности до настоящего времени. Установлено (Исаев, 2012), что за период с 1968 по 2008 г. лесистость Европейской части России изменилась всего на 6–8%. Невосущественно изменилась и породная структура лесов: доля хвойных пород снизилась на 4%, а доля мягколиственных – увеличилась на 5%. Осталось

практически таким же соотношение площадей с различной возрастной структурой лесов.

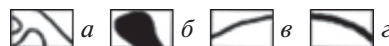
Новейшая “Карта лесных экосистем Северной Евразии”, составленная по спутниковым данным SPOT-Vegetation (Барталев и др., 2011; Исаев, 2012) не могла быть использована. Выделенные на ней “типы растительности” (например, хвойные вечнозеленые леса, хвойные листопадные, лиственные леса вообще, смешанные с преобладанием хвойных, и т.п.) имеют скорее лесопромышленное, нежели лесоведческое значение, что затрудняет интерпретацию этой карты в свете классических законов лесной биогеоценологии, согласно (Сукачев, 1972). Такие категории лесов совершенно не соответствуют принятому в традиционной геоботанике содержательному смыслу понятий “классы растительных формаций” и “типы растительности” (Сочава, 1979), на основе которых и выделяется система природных зон и подзон Волжского бассейна. Более того, в этой легенде не находят отражения важнейшие принципы фитоценологии и биогеоценологии (Базилевич и др., 1986; Вальтер, 1982; Сочава, 1979; Сукачев, 1972), в том числе понятия коренных и производных ассоциаций, эндоэкогенетические и экзогенные динамические смены растительного покрова. Соответственно отсутствует разделение лиственных лесов на широколиственные (коренные), по которым выделяются, как известно, зональные типы и подтипы суббореальной растительности, и леса мелколиственные (производные). Наконец, нет разделения пространств хвойных вечнозеленых пород на ареалы темно- и светлохвойных, что лишает возможности выделять зональные и подзональные биогеосистемы в самом бореальном поясе.

Для съема информации с ландшафтной карты Волжского бассейна применялся известный метод ортогональных сеток. Шаг между узлами сетки был, как правило, меньше среднего поперечника видового ландшафтного контура. Вся территория была покрыта 1467 точками. Аналогичным образом использовались опубликованные картографические материалы по Русской равнине.

Исходная ландшафтная карта включала 67 видов ландшафтов, которые дифференцируются в значительной мере по азональным (геоморфологическим) признакам, согласно (Исаченко, 1965). В целях более четкой зональной “экологизации” ландшафтной карты было проведено повышение ранга ландшафтных единиц до уровня *типологических групп ландшафтов*, в трактовке А.В. Николаева (1978), путем введения польновской системы мезомасштабных ландшафтных сопряжений. Тем самым удалось сблизить ранги рассматриваемых нами ландшафтных единиц с единицами растительного и почвенного покровов. В пределах лесных зон и лесостепи выделено 20 типологических групп ландшафтов (рис. 1).



Тип место-положения	Природные зоны и подзоны				
	Средняя тайга	Южная тайга	Смешанные леса	Широколиственные леса	Лесостепь и северная степь
Элювиальный	1	5	9	13	17
Транс элювиальный	2	6	10	14	18
Транзитный	3	7	11	15	19
Трансаккумулятивный и аккумулятивный	4	8	12	16	20



**Рис. 1.** Карта типологических групп ландшафтов территории Волжского бассейна и его окружения: *а* – территории и акватории речных долин, озер и водохранилищ; *б* – заболоченные территории; *в* – границы групп ландшафтов; *г* – границы природных зон и подзон.

1–20 – порядковые номера типологических групп ландшафтов.

Решение поставленных задач осуществлялось с помощью построения серии взаимосвязанных эмпирико-статистических моделей:

1) теоретико-информационных (А.Д. Арманд, 1975; Пузаченко, Скулкин, 1981), описывающих пространственную геокомпонентную сопряжен-

ность, т.е. *функциональное расслоение*, по терминологии (Черкашин, 2005), с помощью которой был создан региональный банк экологических ниш видов ландшафтов, характеризующий их факторное (параметрическое) пространство;

2) теоретико-множественных (Андреев, 1980), вскрывающих территориально дифференцирующий аспект ландшафтной организации (*объектно-типологическое расслоение*) путем операций с экологическими нишами (дескриптивными векторами) ландшафтных систем, с получением различных мер их сходства и включения;

3) кластерных (таксономических) моделей (Дюран, Оделл, 1977; Жуков и др., 1980), характеризующих соподчиненную структуру ландшафтно-зональных связей (*иерархическое расслоение*).

Многомерный ландшафтно-экологический анализ зональных геопространств Русской равнины проведен в рамках понятийной концепции о *структурных уровнях природно-территориальной организации, опирающейся на кибернетическую модель природного комплекса “фон–каркас–узор” как иерархической системы управления* (Коломыц, 1988). Дадим некоторые пояснения. Территориальное многообразие природной среды представлено функциями *зонального фона* и *пространственного каркаса*, а также расслоенным пространством *ландшафтного узора* (эпигенетической структуры) по элементам каркаса в конкретных условиях. Физико-географический фон характеризует общий материально-энергетический уровень природно-территориальной организации. Фоновая функция – это непрерывное распределение признака без заметных скачков. Каркас ландшафта представляет собой совокупность наиболее пространственно протяженных и наименее изменчивых во времени структурно-функциональных элементов, которые соответствуют территориальному масштабу данной геосистемы и определяют соответствующую относительно замкнутую сеть переноса вещества и энергии, а также узлы и линии точек поворота геопотоков. Ландшафтный узор – это ландшафтно-типологическая дифференциация (расслоение) зонального фонового пространства на базе территориального и факторального каркаса. Геополья и геопотоки при граничных условиях физико-географического фона и данного каркаса формируют *процессор*; его характеристики являются факторами прямого ландшафтообразующего действия.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Факторное пространство и общая таксономическая модель природной зональности*

В ландшафтно-зональном геопространстве каждый геокомпонент рассматривался в системе структурных уровней “фон–каркас–узор”, где

фон и каркас с процессором (геопотоками) образуют входные переменные, а группы ландшафтов выступают как выход системы (узор). Все геокомпонентные признаки распределены по блокам кибернетической модели (табл. 1).

Согласно (А.Д. Арманд, 1975; Пузаченко, Скулкин, 1981), рассчитывались две меры пространственных связей явления  $A$  (типологической группы ландшафтов) и фактора  $B$  (геокомпонентного признака), в долях единицы:

1) нормированный коэффициент сопряженности  $K(A;B)$ :

$$K(A;B) = \frac{2^{T(AB)} - 1}{2^{H(\min A,B)} - 1}, \quad (1)$$

2) коэффициент приема информации  $K(B/A)$ :

$$K(B/A) = \frac{T(AB)}{H(B)}. \quad (2)$$

Здесь  $2^{T(AB)}$  – число состояний явления  $A$  и фактора  $B$ ,  $H(A)$  и  $H(B)$  – общие меры их разнообразия (априорная негэнтропия),  $T(AB)$  – общее количество информации, переданное от фактора к явлению. Значение  $K(A;B) = 0.19$  примерно соответствует коэффициенту корреляции 0.7 (Пузаченко, Скулкин, 1981).

Результаты информационно-картографического анализа пространственной сопряженности групп ландшафтов (ГЛ) с характеристиками различных функциональных блоков природного комплекса (см. табл. 1) выявили ведущую роль не только первичных входных (фоново-каркасных), но и процессорных вещественно-энергетических параметров, определяющих общую зональную структуру Русской равнины. В качестве доминирующих начальных входных переменных, обладающих максимальной независимостью, оказались: годовая суммарная радиация ( $Qc$ ), годовая сумма осадков ( $r(zod)$ ), типы морфоструктур и морфоскульптур ( $MCT + MCK$ ) и механический состав почвообразующих пород ( $Cnn$ ). Следуя методу, изложенному в (Пузаченко, Скулкин, 1981), зависимость распределения площадей групп ландшафтов по всему зональному спектру Волжского бассейна от указанных входных переменных была выражена в виде следующего линейного полинома, имеющего чисто иллюстративный характер:

$$ГЛ = 0.24Qc + 0.30r(zod) + 0.32(MCT + MCK) + 0.12Cnn + 0.02X. \quad (3)$$

Здесь коэффициентами при аргументах служат коэффициенты приема информации ( $K(B/A)$ ) (см. табл. 1). Сумма всех коэффициентов, включая коэффициент при неизвестном аргументе  $X$ , равна 1.

Как видно из уравнения, дифференциация групп ландшафтов бореального экотона почти

**Таблица 1.** Информационные показатели связей групп ландшафтов с геокомпонентными признаками различных блоков кибернетической модели региональных геосистем

Геокомпонентные признаки		Параметры связей	
Но- мер	Наименование и обозначение		
Физико-географический фон и ландшафтный каркас		$K(A;B)$	$K(B/A)$
1	Годовая суммарная радиация, $Q_C$	0.120	0.238
2	Средняя температура января, $t(январь)$	0.085	0.224
3	Коэффициент зимней континентальности Полозовой, $K_3(Пол)$	0.168	0.357
4	Годовой поверхностный сток, $S(год)$	0.145	0.350
5	Максимальная высота снежного покрова, $h(сн)$	0.099	0.251
6	Снежно-температурный коэффициент Рихтера, $СТК$	0.104	0.267
7	Коэффициент снежности Осокина, $K(сн)$	0.202	0.251
8	Типы морфоструктур, $МСТ$	0.199	0.273
9	Морфоструктура и морфоскульптура, $МСТ + МСК$	0.140	0.321
10	Ступени абсолютных высот, $H(абс)$	0.174	0.200
11	Современные тектонические движения, $F$	0.067	0.176
12	Механический состав почвообразующих пород, $Спп$	0.125	0.183
13	Роды ландшафтов, $РЛ$	0.249	0.321
Нерасчлененная система блоков “каркас–процессор”			
14	Годовой радиационный баланс, $R(год)$	0.166	0.343
15	Годовая сумма осадков, $r(год)$	0.122	0.298
16	Годовой подземный сток, $U(год)$	0.183	0.395
17	Коэффициент стока, $f$	0.129	0.295
18	Глубина залегания грунтовых вод, $Z(гв)$	0.274	0.275
19	Литология и влажность грунтов, $SW(гп)$	0.175	0.253
Процессор (внутренние геопотоки)			
20	Средняя температур июля, $t(июля)$	0.187	0.379
21	Сумма биологически активных температур, $\sum t(ср-сут) \geq 10^0$	0.206	0.404
22	Годовая испаряемость, $E_0$	0.210	0.362
23	Сумма осадков теплого периода, $r(тп)$	0.140	0.317
24	Летние запасы влаги в почве, $W(почв)$	0.296	0.303
25	Радиационный индекс сухости Будыко, $I(Буд)$	0.162	0.361
26	Коэффициент увлажнения Высоцкого–Иванова, $K(увл)$	0.169	0.376
27	Гидротермический коэффициент Селянинова, $ГТК$	0.184	0.379
28	Первичная биопродуктивность, $P(перв)$	0.081	0.166
Ландшафтный узор			
29	Группа видов почв, $ГВП$	0.125	0.309
30	Химический состав грунтовых вод, $J(гв)$	0.183	0.212
31	Почвенно-геохимические комплексы, $SG$	0.142	0.379

*Примечание.* В общем списке геокомпонентных признаков отсутствуют группы растительных формаций, поскольку по данному признаку выделялись сами виды ландшафтов в пределах каждого рода, а также зональных типов и подзональных под-типов.

целиком определяется влиянием четырех указанных факторов. При этом, роль климатических и литогенных входных переменных соразмерна, с некоторым “перевесом” (до 54%) факторов климатической группы. В составе последней влияние поступающей солнечной энергии и атмосферной влаги так же примерно одинаково, между тем как

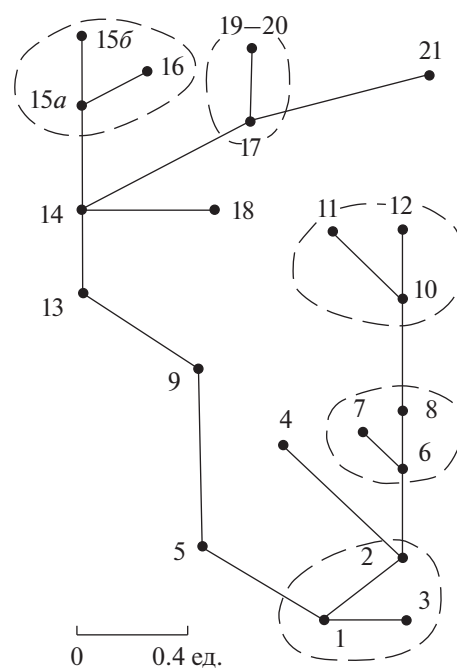
в литогенной группе факторов ведущую роль играют генетические типы рельефа ( $МСТ + МСК$ ). Значение механического состава почвообразующих пород на региональном уровне оказалось гораздо менее значимым.

Ландшафтная структура зональных геопро-странств выражена таксономическими моделями

групп ландшафтов по отношениям сходства их экологических ниш в многомерном пространстве ландшафтно-геофизических факторов. Такая модель построена по всему набору 21 обменно-транзитных признаков (1–7, 14–18 и 20–28, см. табл. 1), с применением метода “вrocławской таксономии” (Жуков и др., 1980). Для этого сначала строилась матрица распределения всех ландшафтно-геофизических параметров (суммарной радиации, радиационного баланса, средней температуры июля и т.д.) по 21 группе ландшафтов. В каждую ячейку этой матрицы помещалась “норма” параметра, свойственная данной ландшафтной группе. При вычислении нормы использовались центральные значения всех градаций данного ландшафтно-геофизического параметра, а также элементы матрицы  $K(A;B)$ , которые были введены в расчеты в качестве “весовых” коэффициентов. Затем вычислялись среднеквадратичные отклонения и нормированные значения признаков, по которым составлялась матрица нормированных значений по всем ГЛ. Наконец, с использованием евклидовой метрики и “весовых” коэффициентов рассчитывались парные таксономические расстояния между ГЛ по всем признакам. В качестве “весовых” коэффициентов использованы приведенные к 1 значения параметра  $K(A;B)$ .

По матрице расстояний построено граф-дерево минимальной длины связи между ГЛ (рис. 2). В основании графа лежит связка среднетаежных геосистем (1–3), охватывающая почти все ландшафтное разнообразие этой подзоны: эрозионно-денудационные, моренные, денудационно- и моренно-зандровые пихто-ельники и сосняки на элювиальных, транзитных и трансэлювиальных местоположениях. От среднетаежной плеяды отходят две ветви последовательного сходства, каждая из которых соответствует генетическим типам рельефа – родам ландшафтов. Левая ветвь состоит из трансзональной цепи ландшафтных групп: 1–5–9–13, 14–18–19, – которые имеют большие таксономические расстояния. Эта цепь характеризует водораздельные природные комплексы и пересекает весь бореальный экотон от средней тайги (ГЛ 1), через южную тайгу (5) и подтайгу (9), далее к широколиственным лесам (13, 14) и, наконец, к лесостепи (18) и северной степи (ГЛ 21).

Правая ветвь графа соответствует средним и нижним звеньям мезомасштабных ландшафтных сопряжений. Это речные долины и понижения с прилегающими к ним нижними и средними склонами междуречий. Данная ветвь прослеживается только до зоны смешанных лесов включительно и отсутствует на южном крыле бореального экотона. В отличие от левой (водораздельной) ветви, она имеет меньшие таксономические расстояния между своими звеньями. Это указывает на более высокую однородность биоклиматиче-



**Рис. 2.** Дерево минимальной длины между группами ландшафтов Волжского бассейна по 25 ландшафтно-геофизическим признакам (см. табл. 1). Группы ландшафтов: *Средняя тайга*: 1 – эрозионно-денудационные и денудационно-зандровые, Э, пихто-еловые и елово-сосновые; 2 – моренные и моренно-зандровые, Э и Т, пихто-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, пихто-еловые; 6 – моренные и озерно-ледниковые, Э и ТЭ, еловые и елово-сосновые; 7 – денудационно- и моренно-зандровые; Т, пихто-еловые; 8 – зандровые и долинно-зандровые, ТА и А, елово-сосновые. *Смешанные леса*: 9 – эрозионно-денудационные, Э и ТЭ, широколиственно-пихто-еловые и дубово-липовые; 10 – моренные и озерно-ледниковые, Э и ТА, еловые и елово-сосновые; 11 – денудационно- и моренно-зандровые, Т, пихто-еловые и елово-сосновые; 12 – зандровые и долинно-зандровые, ТА и А, сосновые и елово-сосновые. *Широколиственные леса*: 13 – эрозионно-денудационные, Э, ясенево-дубово-липовые и сосново-дубовые; 14 – эрозионно-денудационные, Э и ТЭ, дубово-липовые и ясенево-липово-дубовые; 15a – эрозионные и озерно-ледниковые, Т, дубово-липовые и сосново-широколиственные; 15b – 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, ясенево-липово-дубовые, с луговыми степями; 18 – эрозионные и “сыртовые”, ТЭ и Э, лугово-степные 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. Типы мезоместоположений: Э – элювиальный, ТЭ – трансэлювиальный, Т – транзитный, ТА – трансаккумулятивный, А – аккумулятивный.

**Таблица 2.** Распределение структурно-функциональных признаков геосистем по основным геокомпонентным блокам

Блок	Обобщенное наименование	Номера признаков (см. табл. 1)
<b>A</b>	Радиационно-термический режим атмосферы	1, 2, 14, 20–22
<b>B</b>	Составляющие водного баланса территории	4, 5, 15–17, 23
<b>C</b>	Комплексные гидротермические показатели	3, 6, 7, 25–27
<b>D</b>	Геолого-геоморфологические условия	8–13
<b>E</b>	Гидроэдафические условия местоположений	18, 19, 24, 30
<b>F</b>	Первичная биологическая продуктивность	28
<b>G</b>	Почвенно-геохимические комплексы	31

ских условий низменных равнин и речных долин по сравнению с водоразделами.

Таким образом, вырисовываются два различных по своей ландшафтно-геофизической структуре трансзональных экологических пространства. К истокам такой макродифференциации восходят основные причинные механизмы территориальной организации региональных геосистем. Одно из ярких последствий этих форм причинности – характерное для Русской равнины явление прямой и обратной вертикальной дифференциации ландшафтов (Мильков, 1981). Первое, водораздельное, экопространство полностью трансзонально, однако более “размытое”; оно отличается меньшей однородностью ландшафтно-геофизических условий между звеньями цепи зональных переходов. Второе, низменно-долинное, пространство ограничено только северным крылом экотона и не простирается южнее зоны смешанных лесов, поэтому его можно именовать собственно бореальным экопространством низменных равнин.

#### *Функциональная организация ландшафтно-зональных геопространств*

Качественная определенность каждой группы ландшафтов и особенности размещения ее ареалов должны определяться характером контактной геокомпонентной структуры и степенью ее геосинэргической однородности (Хаазе, 1980). Степень “контактности и геосинэргичности” ландшафтной структуры природных зон (подзон) была выражена через меру тесноты связей (МТС) между признаками различных геокомпонентов. Такой подход основан на представлениях о преобладании в географической оболочке не функциональных, а стохастических связей, с принципиально вероятностным характером географического детерминизма (Арманд и др., 1969). С этой целью все рассматриваемые геокомпонентные признаки были сгруппированы в 7 блоков (табл. 2), которые характеризуют три входных системообразующих фактора (приземную атмосферу, континентальную гидросферу и поверхностную литосферу), а также

две выходных характеристики ландшафтов – первичную биопродуктивность и почвенно-геохимические комплексы.

На основе матриц частот совместной встречаемости каждой пары *A* и *B* признаков (по их соответственно *i*-м и *j*-м градациям) рассчитывались парциальные коэффициенты связи, согласно (А.Д. Арманд, 1975):

$$K_{ij} = 2P_{ij}/(P_i + P_j), \quad (4)$$

где  $P_{ij}$  – условные, а  $P_i$  и  $P_j$  – априорные вероятности. Очевидно, что  $0 < K_{ij} < 1$ . Для каждой точки измерительной сети составлялась матрица  $K_{ij}$  между всеми 30 признаками. В каждой клетке матрицы помещались те значения  $K_{ij}$ , которые отвечают парному сочетанию градаций признаков, принадлежащему данной точке. Объединением точек по ареалам групп ландшафтов получали значения МТС для соответствующих объектов.

Далее, из начальных (полных) матриц мер тесноты межкомпонентных связей удалялись все значения  $K_{ij}$  между признаками внутри каждого геокомпонентного блока и оставлены только межблочные отношения, которые образовали вторую группу матриц. Здесь параметр  $K_{ij}$  характеризовал уже меру связей между пятью входными абиотическими геокомпонентными блоками (**A**, **B**, **C**, **D** и **E**), а также между двумя выходными характеристиками (**F** и **G**, см. табл. 2). Тем самым был получен показатель степени *взаимной эквивалентности (конформности) коррелятных геокомпонентных признаков* в пределах ареалов данной ГЛ, а также в любом выбранном для анализа вышестоящем по рангу геопространстве. По данному показателю были установлены семь классов эквивалентности структурно-функциональных блоков в ландшафтах Волжского бассейна (табл. 3).

На мерах тесноты связей между ландшафтообразующими признаками построены кластерные модели геокомпонентных структур всего бореального экотона и его зональных подразделений. На общей кластер-дендрограмме (рис. 3) выделяются пять основных кластеров, объединяющие три первых уровня эквивалентности признаков. Наиболее высокий уровень образуют следующие



**Таблица 3.** Распределение значений парциального коэффициента межкомпонентных связей по классам эквивалентности структурно-функциональных блоков групп ландшафтов

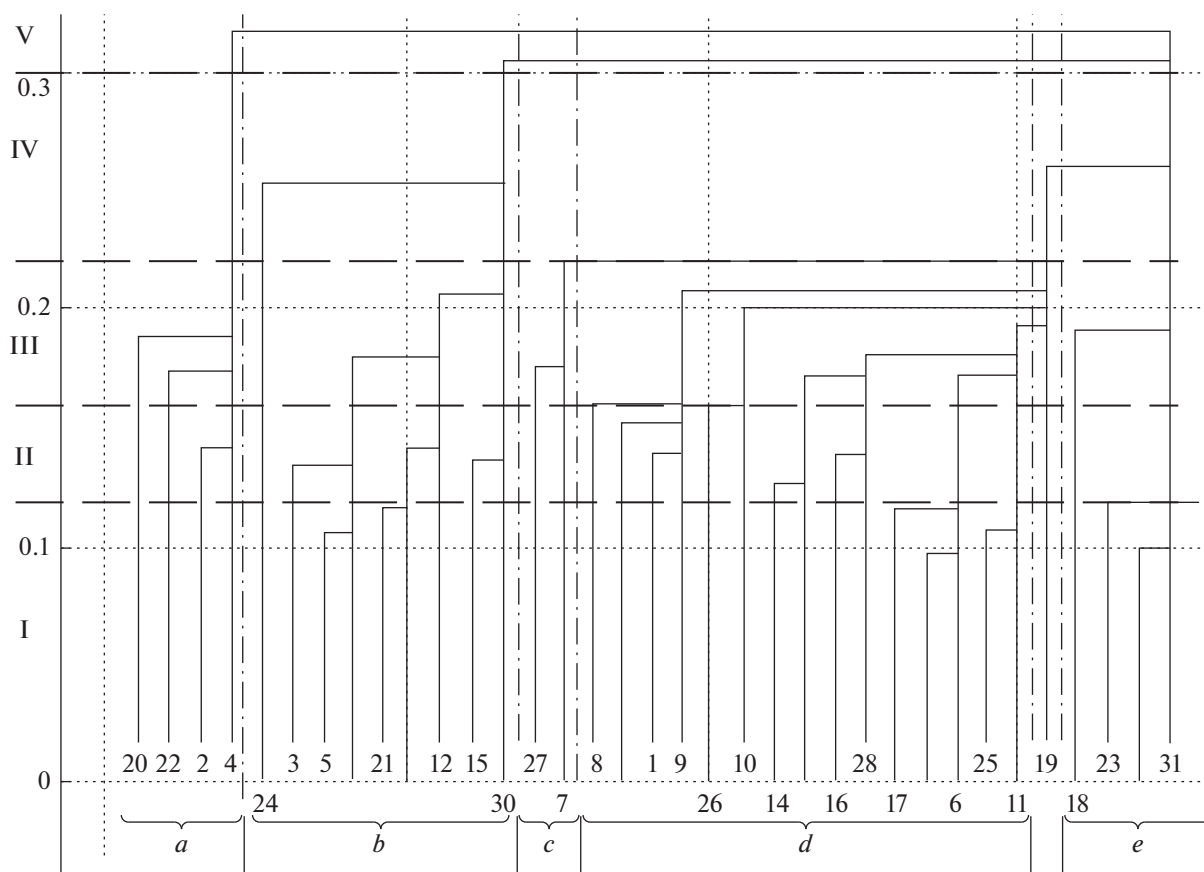
Показатель	Класс эквивалентности						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Коэффициент связи	0.504– –0.307	0.306– –0.255	0.254– –0.216	0.215– –0.185	0.184– –0.146	0.145– –0.110	0.109– –0.037

связки признаков, которые назовем *геосинэргическими “ядрами” геокомпонентной структуры природных зон* (обозначения см. в табл. 1): в кластере *a* –  $[t(явв)–S(год)]–E_0–t(июл)$ ; в кластере *b* –  $[h(сн)–Кл(Пол)]–[\sum t(ср-сут) \geq 10^0–r(хп)–C(пн)–r(год)–J(зв)]$ ; в кластере *c* –  $[K(сн)–ГТК]$ ; в кластере *d* –  $[(f–СТК)]–[(I(Буд)–F)]–SW(зр)–[Q_c–(MCT+MCK)]–K(увл)–R(год)–P(перв)]$ ; в кластере *e* –  $[SG–r(mn)]–Z(зв)$ .

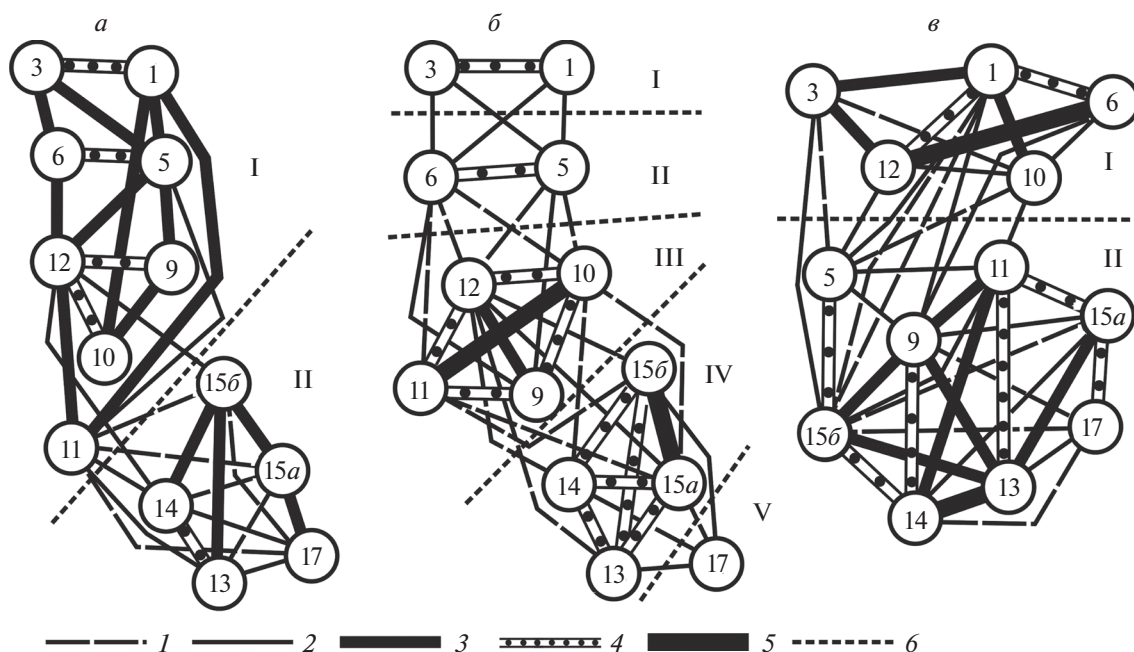
Характерно множество связей между гидроклиматическими факторами, которое существенно повышает геосинэргическую однородность зональных геопространств, а также вносит приоритетный вклад в разнообразие ландшафтов.

Признаки же литогенной группы не имеют аналогичного количества перекрестных взаимосвязей и поэтому не могут создавать подобного разнообразия. По кластер-дендрограммам выявлены следующие свойства параметрического пространства бореального экотона Русской равнины.

1. Признаки ландшафтного каркаса и фона обладают большей геосинэргической гомогенностью, нежели процессорные параметры. Локально-региональные геопотоки преломляют начальные связи между входными переменными в сторону их определенной разбалансированности, создавая мозаику местных отклонений от фоно-



**Рис. 3.** Кластер-дендрограмма тесноты связей между ландшафтообразующими признаками (см. табл. 1) в целом по всему бореальному экотону. 0–0.1–0.2–0.3 – евклидово расстояние. I–V – уровни эквивалентности признаков. *a–e* – основные кластеры.



**Рис. 4.** Корреляционные плеяды групп видов ландшафтов Волго-Вятского региона в их зависимости от годового радиационного баланса (а), суммы биологически активных температур (б) и годового количества осадков (в). 1, 2, 3, ... – группы ландшафтов (см. рис. 1). Мера сходства: 1 – 0.01–0.020; 2 – 0.21–0.40; 3 – 0.41–0.60; 4 – 0.61–0.80; 5 – 0.80–0.100. 6 – границы между плеядами первого уровня сходства. I–V – корреляционные плеяды.

во-каркасной “нормы” и повышая уровень разнообразия ландшафтов.

2. По геосинэргетике ландшафтного каркаса средне- и южнотаежные геопространства наиболее близки к обобщенной ситуации на экотоне. По мере движения в сторону широколиственных лесов и южной лесостепи наблюдается усиление тесноты взаимосвязей каркасных признаков. Это указывает на общее повышение единства первичных входных переменных на южном крыле экотона, где значительное их число образуют кластеры уже на I уровне эквивалентности. На северном же крыле экотона, особенно в зоне смешанных лесов, объединение каркасных признаков в кластеры начинается только со II-го уровня.

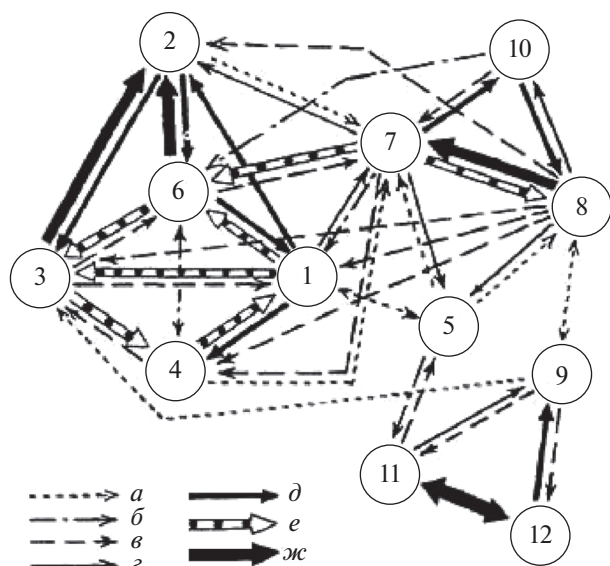
3. Среди процессорных признаков аномально высокой геосинэргичной однородностью отличается средняя тайга. В этом “ядре типичности” бореального пояса взаимообусловленность геокомпонентов явно усиливается локально-региональными геопотоками уже на II–III уровнях эквивалентности, благодаря чему обеспечивается относительно высокое генетическое единство собственно бореальных ландшафтов. В более южных зональных геосистемах число кластеров в блоке процессора остается весьма большим при всех уровнях общности. Это означает, что местные геопотоки здесь дробят параметрическое пространство на группы слабо связанных ландшафтообразующих факторов. Таким образом, в пределах бореального экотона

формируется комплекс процессорных признаков (прямого ландшафтообразующего воздействия) с гораздо более низкой взаимной эквивалентностью, нежели в “ядре типичности” бореального пояса. В этом видится одна из причин повышенной чувствительности зональных подразделений экотона и границ между ними к фоновым возмущениям гидро-климатической системы.

#### *Ландшафтная типология зональных геопространств*

Типологическое расслоение ландшафтно-зональной полисистемы Волжского бассейна проведено по шести блокам структурно-функциональных признаков ландшафтов (см. табл. 2). Выполнялось теоретико-множественное моделирование сначала групп ландшафтов как однородных единиц, а затем и зональных геопространств, с их гетерогенной ландшафтной структурой.

Оценивались бинарные отношения (меры сходства и включения) ГЛ по множеству факторов их формирования, объединенных в указанные группы (см. табл. 2). Каждая пара групп ландшафтов  $A$  и  $B$  характеризовалась одним и тем же  $n$  числом элементов  $a_i$  и  $b_i$  из данной группы факторов, с определенными численными значениями. Меры сходства  $N(a_i, b_i)$ , а также взаимного включения  $J(a_i, b_i)$  и  $J(b_i, a_i)$  элемента  $a_i$  в  $b_i$  и элемента



**Рис. 5.** Орграф отношений включения групп видов ландшафтов таежной и подтаежной зон по средней температуре июля. Мера включения:  $a - \leq 0.30$ ;  $b - 0.31-0.40$ ;  $в - 0.41-0.50$ ;  $г - 0.51-0.60$ ;  $д - 0.61-0.70$ ;  $е - 0.71-0.80$ ;  $ж - 0.81-0.92$ . 1, 2, 3, ... – группы ландшафтов (см. рис. 1).

$b_i$  в  $a_i$  находились из соотношений (Андреев, 1980):

$$N(a_i, b_i) = \frac{2(a_i \cap b_i)}{a_i + b_i}; \quad J(a_i, b_i) = \frac{a_i \cap b_i}{a_i}; \quad (5)$$

$$J(b_i, a_i) = \frac{a_i \cap b_i}{b_i}.$$

По мерам сходства проведена оценка парциального влияния различных гидро-климатических факторов на ландшафтную структуру зональных геопространств. На графах сходства (рис. 4) были выделены корреляционные плеяды ландшафтных объединений путем задания двух порогов однородности: при  $N(A, B) > 0.40$  и при  $N(A, B) > 0.60$ .

По величине  $N(A, B)$  отчетливо выражена климатическая граница между бореальным и суббореальными поясами (см. рис. 4а). При этом лесостепь (вместе с широколиственными лесами) менее однородна, чем средняя и южная тайга и подтайга. По сумме биологически активных температур (см. рис. 4б), годовой испаряемости и радиационному индексу сухости множество ГЛ разбивается на пять зональных типов (подтипов) уже на первом уровне сходства, с четким обособлением средней и южной лесостепи. Наиболее резок переход от южной тайги к смешанным лесам. Эту границу, по-видимому, и следует считать *основным климатическим рубежом между бореальным и суббореальными поясами*. Годовое количество осадков

предопределяет весьма “размытую” дифференциацию зональных геопространств (см. рис. 4в).

Меры включения позволяют упорядочить рассматриваемые геосистемы в ряды *экологических групп*, или *экотипов*, по (Одум, 1975), которые характеризуют уровень структурно-функционального развития каждой из них, а также эффективность использования биотой ресурсов абиотической среды. В общем случае  $J(a_i, b_i) \neq J(b_i, a_i)$ , т.е. бинарные отношения включения нетранзитивны. При  $J(A; B_i) > J(B; A)$  можно говорить о том, что геосистема  $A$  проще по структуре и функционированию и менее устойчива, чем система  $B$ , в отношении данного фактора, а при  $J(A; B_i) < J(B; A)$  – напротив, она оказывается более высокоразвитой и более устойчивой.

В качестве примера приведем теоретико-множественную модель ландшафтно-типологической организации природных зон (подзон) Волжского бассейна по фактору среднеиюльской температуры (рис. 5). На орграфе отчетливо виден, прежде всего, резкий контраст в отношениях включения ГЛ между средней и южной тайгой, с одной стороны, и смешанными лесами – с другой. Таежные геосистемы отличаются большими пересечениями экологических ниш, т.е., более высокой повторяемостью в пространстве одних и тех же термических условий летнего сезона. Судя по количеству и “мощности” входных стрелок (ребер орграфа), наибольшим разнообразием по фактору среднеиюльской температуры отличаются: в подзоне средней тайги трансэлювиальные (2) и транзитные (3) ландшафтные группы (моренные, и зандровые пихто-ельники и сосняки), а в южно-таежной подзоне – ландшафты 5-й элювиальной группы. Наименее разнообразны среднетаежные эрозионно-денудационные и денудационно-зандровые пихто-ельники и сосняки (ГЛ 1), с максимальными числом и “мощностью” выходных стрелок).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено численное обоснование концептуального положения отечественного естествознания о генетическом единстве природной зоны и географического ландшафта. С помощью полисистемного моделирования описаны причинные механизмы формирования ландшафтно-зональных геопространств при взаимодействии разнокачественных природных компонентов – гидроклиматических, литогенных и почвенно-биотических. Впервые дана интерпретация послышной функции факторного воздействия в разных математических формулах. С их помощью выражены парные количественные и качественные взаимосвязи: евклидовое расстояние, частота совместной встречаемости, мера сходства множеств гра-

даций признаков. В результате раскрыты те причинно-следственные связи между структурными элементами ландшафта и факторами его формирования, которые объединяют эти элементы в единое зональное целое.

2. Выявлено региональное разнообразие зональных способов организации географической среды и соответствующее многообразие формирования дискретных природно-территориальных образований (региональных ландшафтов) в системе непрерывных гидро-климатических полей. Эти силовые поля создают вещественно-энергетический каркас ландшафтных комплексов, который, взаимодействуя с литогенным каркасом, создает целую серию парциальных ландшафтных структур.

3. На примере бореального экотона Русской равнины и его зональных элементов показано, насколько эти достаточно крупные подразделения субконтинентальной биосферы являются комплексными образованиями и, следовательно, в какой мере региональные биоклиматические системы могут служить объектами ландшафтного исследования.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев В.Л.* Классификационные построения в экологии и систематике. М.: Наука, 1980. 142 с.
- Арманд А.Д.* Информационные модели природных комплексов. М.: Наука, 1975. 126 с.
- Арманд А.Д.* Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука, 1988. 260 с.
- Арманд Д.Л.* Наука о ландшафте. М.: Мысль, 1975. 287 с.
- Арманд Д.Л., Преображенский В.С., Арманд А.Д.* Природные комплексы и современные методы их изучения // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1969. № 5. С. 5–16.
- Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. М.: Наука, 1986. 297 с.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В. и др.* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Совр. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Берг Л.С.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. II. Физическая география. 426 с.
- Вальтер Г.* Растительность Земного Шара. Эколого-физиологическая характеристика. М.: Прогресс, 1974. Т. II. 423 с.
- Герасимов И.П.* Экологические проблемы в прошлой, настоящей и будущей географии Мира. М.: Наука, 1985. 247 с.
- Григорьев А.А.* Закономерности строения и развития географической среды. М.: Мысль, 1966. 382 с.
- Григорьев А.А.* Типы географической среды. Избранные теоретические работы. М.: Мысль, 1970. 550 с.
- Докучаев В.В.* О законности известного географического распределения наземно-растительных почв на территории Европейской России // Тр. С.-Петербург. общ-ва естествоиспытателей. СПб., 1881. Т. XII. С. 65–66.
- Докучаев В.В.* Учение о природных зонах. М.: Географгиз, 1948. 63 с.
- Дюран Б., Оддел П.* Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. 128 с.
- Жуков В.Т., Сербенюк С.Н., Тикун В.С.* Математико-картографическое моделирование в географии. М.: Мысль, 1980. 224 с.
- Зейдис И.М., Кружалин В.И., Симонов Ю.Г. и др.* Общие свойства динамики геосистем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2001. № 4. С. 3–8.
- Исаченко А.Г.* Основы ландшафтоведения и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1965. 327 с.
- Карта растительности Европейской части СССР. М-б 1 : 2500000 / ред. Т.И. Исаченко, Е.М. Лавренко. М.: ГУГК, 1974. 6 л.
- Коломыц Э.Г.* Бореальный экотон и географическая зональность. Прогнозный Атлас-монография. М.: Наука, 2005. 390 с.
- Коломыц Э.Г.* Экотон как объект физико-географического исследования // Изв. РАН. Сер. геогр. 1988. № 5. С. 24–36.
- Мильков Ф.Н.* Физическая география: современное состояние, закономерности, проблемы. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1981. 398 с.
- Николаев В.А.* Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 62 с.
- Одум Ю.* Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.
- Преображенский В.С., Александрова Т.Д., Максимова Л.В.* География в меняющемся мире. Век XX. М.: Ин-т географии РАН, 1997. 273 с.
- Пузаченко Ю.Г.* Глобальное биологическое разнообразие и его пространственно-временная изменчивость // Современные глобальные изменения природной среды. М.: Научный мир, 2006. Т. 2. С. 306–377.
- Пузаченко Ю.Г., Скулкин В.С.* Структура растительности лесной зоны СССР: Системный анализ. М.: Наука, 1981. 275 с.
- Разнообразие и динамика лесных экосистем России. Кн. 2 / ред. А.С. Исаев. М.: КМК, 2012. 478 с.
- Растительность Европейской части СССР и Кавказа. М-б 1 : 2000000 / ред. Т.В. Котова. М.: ГУГК, 1987. 4 л.

- Сочава В.Б.* География и экология: Материалы 5-го Съезда Географического общества СССР. Л.: ВГО, 1970. 42 с.
- Сочава В.Б.* Растительный покров на тематических картах. Новосибирск: Наука, 1979. 189 с.
- Сочава В.Б.* Избранные труды. Теоретическая и прикладная география. Новосибирск: Наука, 2005. 288 с.
- Сукачев В.Н.* Избранные труды. Л.: Наука, 1972. Т. 1. Основы лесной типологии и биогеоценологии. 418 с.
- Хаазе Г.* Изучение топических и хорических структур, их динамики и развития в ландшафтных системах // Структура, динамика и развитие ландшафтов / отв. ред. В.С. Преображенский. М.: Ин-т географии АН СССР, 1980. С. 57–81.
- Хорошев А.В.* Рельеф как фактор полимасштабной организации межкомпонентных связей в лесных ландшафтах Восточно-Европейской равнины // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 3. С. 35–42.
- Хорошев А.В.* Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: КМК, 2016. 416 с.
- Хорошев А.В., Мерекалова К.А., Алещенко Г.М.* Полимасштабная организация межкомпонентных отношений в ландшафте // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1 С. 26–36.
- Черкашин А.К.* Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука, 2005. 280 с.
- Черкашин А.К.* Геокартографическое мышление в современной науке // Геодезия и картография. 2020. № 7. С. 27–36.
- Forman R. T. T.* Landscape Mosaics. Cambridge Univ. Press, 2006. 632 p.
- Marceau D.J.* The Scale issue in social and natural sciences // Canad. J. Remote Sens. 1999. Vol. 25. № 4. P. 347–356.
- Phillips J.D.* Global and local factors in earth surface systems // Ecol. Modeling. 2002. Vol. 149. № 3. P. 257–272.
- Pickett S.T.F., Cadenasso M.L.* The ecosystem as a multidimensional concept: meaning, model, and metaphor // Ecosystems. 2002. Vol. 5. P. 1–10.
- Turner M., Gardner R.Y., O'Neill R.V.* Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process. Springer Verlag, 2001. 352 p.
- Wu J., Hobbs R.* Key issues and research priorities in landscape ecology. An idiosyncratic synthesis // Landscape Ecol. 2002. Vol. 17. № 4. P. 355–365.

## Mechanisms of Formation of the Landscape-Zonal Systems (Empirical-Statistical Modeling)

E. G. Kolomyts\*

*Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Fundamental Problems of Biology, Pushchino, Russia*

\*e-mail: egk2000@mail.ru

Numerical substantiation of the conceptual position of the native geographical ecology on the genetic unity of the natural zone and geographical landscape is presented. Quantitative assessments of the landscape organization of the boreal ecotone, an ensemble of zonal transitions from the boreal belt to the sub-boreal belt in the East European subcontinent, were carried out on the basis of well-known methodological approaches to the poly-system analysis of the geographical environment. The problem was solved using empirical-statistical models of landscape-zonal connections. The cybernetic model of natural complexes developed by the author as a hierarchical system of their organization was used as a working tool for analysis. Three methodological approaches to poly-system analysis have been implemented: (1) functional, with the allocation of the structures of ecological niches of landscape units in their factorial space; (2) typological, with the differentiation of the territory by groups of landscapes and the analysis of their interaction; (3) hierarchical, using cluster (taxonomic) landscape classification models. Measures of the tightness of connections between various geo-components in a set of landscape units are obtained, and based on these measures, geo-synergic kernels of parametric homogeneity of zonal geo-spaces are obtained. Specific partial landscape structures are established, formed by the most closely related geo-components and determining the face of landscape-zonal systems. With the help of information modeling, a differentiated assessment of the landscape organization of natural zones (sub-zones) was carried out by operations with equivalence matrices of geo-component blocks. The territorial space of the boreal ecotone and its zonal parts is described by the set-theoretical and cluster models of geo-complex connections. On the basis of quantitative criteria, the contribution of various factors to the landscape organization of the zonal geo-space is estimated. This makes it possible to determine the degree of sensitivity of the landscape structure of a given territory to changes in zonal-climatic conditions, which is directly related to assessments of the stability of landscape-zonal systems in a changing climate.

*Keywords:* natural zone, boreal ecotone, regional landscape, hierarchical natural-territorial organization, geo-components, empirical-statistical modeling

## REFERENCES

- Andreev V.L. *Klassifikatsionnye postroeniya v ekologii i sistematike* [Classification Constructs in Ecology and Systematics]. Moscow: Nauka Publ., 1980. 142 p.
- Armand A.D. *Informatsionnye modeli prirodnykh kompleksov* [Information Models of Natural Complexes]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 126 p.
- Armand A.D. *Samoorganizatsiya i samoregulirovanie geograficheskikh sistem* [Self-Organization and Self-Regulation of Geographical Systems]. Moscow: Nauka Publ., 1988. 260 p.
- Armand D.L. *Nauka o landshafte* [Landscape Science]. Moscow: Mysl' Publ., 1975. 287 p.
- Armand D.L., Preobrazhensky, V.S., Armand, A.D. Natural complexes and modern methods of their study. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Geogr.*, no. 5, 1969, pp. 5–16. (In Russ.).
- Bartalev, S.A., Egorov, V.A., Ershov, D.V. et al. Satellite mapping of the vegetation cover of Russia based on MODIS spectroradiometer data. *Sovr. Probl. Distantsionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 285–302. (In Russ.).
- Bazilevich N.I., Grebenshchikov O.S., Tishkov A.A. *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funktsionirovaniya ekosistem* [Geographic Patterns of Structure and Functioning of Ecosystems]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 297 p.
- Berg L.S. *Izbrannye trudy* [Selected Works]. Vol. 2: *Fizicheskaya geografiya* [Physical Geography]. Moscow: Akad. Nauk SSSR, 1958. 426 p.
- Cherkashin A.K. Geocartographic thinking in modern science. *Geodeziya i Kartografiya*, 2020, no. 7, pp. 27–36. (In Russ.).
- Cherkashin A.K. *Polisistemnoe modelirovanie* [Polysystemic Modeling]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005. 280 p.
- Dokuchaev V.V. On the legality of the known geographical distribution of land-plant soils on the territory of European Russia. *Tr. S.-Peterb. O-va Estestvoispyt.*, 1881, vol. 12, pp. 65–66. (In Russ.).
- Dokuchaev V.V. *Uchenie o prirodnykh zonakh* [Doctrine about Natural Zones]. Moscow: Geografiz Publ., 1948. 63 p.
- Durand B.S., Odell P.L. *Cluster Analysis: A Survey*. Springer, 1974. 146 p.
- Forman R.T.T. *Landscape Mosaics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006. 632 p.
- Gerasimov I.P. *Ekologicheskie problemy v proshloi, nastoyashchei i budushchei geografii Mira* [Ecological Problems in the Past, Present and Future Geography of the World]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 247 p.
- Glazovskaya M.A. *Geokhimiya prirodnykh i antropogennykh landshaftov SSSR* [Geochemical Foundations of Typology and Methods of Researching Natural Landscapes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ. Publ., 1964. 230 p.
- Grigor'ev A.A. *Tipy geograficheskoi sredy. Izbrannye teoreticheskie raboty* [Types of Geographic Environment. Selected Theoretical Works]. Moscow: Mysl' Publ., 1970. 550 p.
- Grigor'ev A.A. *Zakonomernosti stroeniya i razvitiya geograficheskoi sredy* [Regularities of the Structure and Development of the Geographic Environment]. Moscow: Mysl' Publ., 1966. 382 p.
- Isachenko A.G. *Osnovy landshaftovedeniya i fiziko-geograficheskoe raionirovanie* [Fundamentals of Landscape Science and Physical and Geographical Regionalization]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1965. 327 p.
- Khaaze G. Study of topical and choric structures, their dynamics and development in landscapesystems. In *Struktura, dinamika i razvitie landshaftov* [Structure, Dynamics, and Development of Landscapes]. Preobrazhenskii V.S., Ed. Moscow: Inst. Geogr. Akad. Nauk, 1980, pp. 57–81. (In Russ.).
- Khoroshev A.V. *Polimasshtabnaya organizatsiya geograficheskogo landshafta* [Polyscale Organization of the Geographical Landscape]. Moscow: KMK Publ., 2016. 416 p.
- Khoroshev A.V. Relief as a factor of multi-scale organization of intercomponent connections in forest landscapes of the East European Plain. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2010, no. 3, pp. 35–42. (In Russ.).
- Khoroshev A.V., Merekalova K.A., Aleshchenko G.M. Polyscale organization of intercomponent relations in the landscape. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2010, no. 1, pp. 26–36. (In Russ.).
- Kolomyts E.G. *Boreal'nyi ekoton i geograficheskaya zonal'nost'. Prognoznyi Atlas-monografiya* [Boreal Ecotone and Geographic Zonality: Atlas-Monograph]. Moscow: Nauka Publ., 2005. 390 p.
- Kolomyts E.G. *Ekspperimental'naya geograficheskaya ekologiya. Zapiski geografa-naturalista* [Experimental Geographic Ecology. The Record of Geographer-Naturalist]. Moscow: KMK Publ., 716 p.
- Marceau D.J. The scale issue in social and natural sciences. *Canad. J. Remote Sensing*, 1999, vol. 25, no. 4, pp. 347–356.
- Mil'kov F.N. *Fizicheskaya geografiya: sovremennoe sostoyanie, zakonomernosti, problem* [Physical Geography: Current State, Patterns, Problems]. Voronezh: Voronezh. Univ. Publ., 1981. 398 p.
- Nikolaev V.A. *Klassifikatsiya i melkomasshtabnoe kartografirovanie landshaftov* [Classification and Small-Scale Mapping of Landscapes]. Moscow: Mosk. Gos. Univ. Publ., 1978. 62 p.
- Phillips J.D. Global and local factors in earth surface systems. *Ecological Modeling*, 2002, vol. 149, no. 3, pp. 257–272.
- Pickett S.T.F., Cadenasso M.L. The ecosystem as a multi-dimensional concept: meaning, model, and metaphor. *Ecosystems*, 2002, vol. 5, pp. 1–10.
- Preobrazhenskii V.S., Aleksandrova T.D., Maksimova L.V. *Geografiya v menyayushchemsya mire. Vek XX* [Geography in a Changing World. XX Century]. Moscow: Inst. Geogr. RAN, 1997. 273 p.
- Puzachenko Yu.G. Global biological diversity and its spatial and temporal variability. In *Sovremennye global'nye izmeneniya prirodnoi sredy* [Modern Global Changes in the Natural Environment]. Moscow: Nauchn. Mir Publ., 2006, vol. 2, pp. 306–377. (In Russ.).
- Puzachenko Yu.G., Skulkin. V.S. *Struktura rastitel'nosti lesnoi zony SSSR: Sistemnyi analiz* [Structure of Forest Zone Vegetation for USSR. System Analysis]. Moscow: Nauka Publ., 1981. 275 p.

- Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii* [Diversity and Dynamics of Russian Forest Ecosystems]. Isaev A.S., Ed. Moscow: KMK Publ., 2012. 478 p.
- Sochava V.B. *Geografiya i ekologiya: Materialy 5-go S"ezda Geograficheskogo obshchestva SSSR* [Geography and Ecology. Proceedings of the 5th Congress of the Geographical Society of the USSR]. Leningrad: VGO, 1970. 42 p.
- Sochava V.B. *Izbrannye trudy. Teoreticheskaya i prikladnaya geografiya* [Selected Works. Theoretical and Applied Geography]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005. 288 p.
- Sochava V.B. *Rastitel'nyi pokrov na tematicheskikh kartakh* [Vegetation Cover on Thematic Maps]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1979. 189 p.
- Sukachev V.N. *Izbrannye trudy* [Selected Works]. Vol. 1: *Osnovy lesnoi tipologii i biogeotsenologii* [Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology]. Leningrad: Nauka Publ., 1972. 418 p.
- Turner M., Gardner R.Y., O'Neill R.V. *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. Springer Verlag, 2001. 352 p.
- Vegetation Map of the European Part of the USSR*. Scale 1 : 2500000. Isachenko T.I., Lavrenko E.M., Eds. Moscow: GUGK, 1974. 6 p. (In Russ.).
- Vegetation of the European Part of the USSR and the Caucasus*. Map. Scale 1 : 2000000. Kotova T.V., Ed. Moscow: GUGK, 1987. 4 p. (In Russ.).
- Walter G. *Rastitel'nost' zemnogo shara. Ekologo-fiziologicheskaya kharakteristika* [Vegetation of the Globe. Ecological and Physiological Characteristics]. Moscow: Progress Publ., 1974, vol. 2. 423 p.
- Wu J., Hobbs R. Key issues and research priorities in landscape ecology. An idiosyncratic synthesis. *Landscape Ecology*, 2002, vol. 17, no. 4, pp. 355–365.
- Zeidis I.M., Kruzhalin V.I., Simonov Yu.G. et al. General properties of the dynamics of geosystems. *Vestn. Mos. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2001, no. 4, pp. 3–8. (In Russ.).
- Zhukov V.T., Serbenyuk S.N., Tikunov V.S. *Matematiko-kartograficheskoe modelirovanie v geografii* [Mathematical-Cartographic Modeling in Geography]. Moscow: Mysl' Publ., 1980. 224 p.