



УДК 911.5:168.2:51-7(571.53)  
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.35.125>

## Иерархическая классификация географических систем

А. К. Черкашин

*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия*

**Аннотация.** Разрабатываются теоретические основы создания иерархической классификации геосистем с использованием концептуальной модели географических циклов накопления и снятия факторной нагрузки на территориальные объекты различного масштаба. В качестве базовой метамодели иерархического строения рассматривается конус хорологических и типологических связей. Для его исследования привлекаются средства описательной геометрии для представления конуса во фронтальной и плановой проекциях. Поверхностная структура и развертка конуса с сечениями на разных уровнях моделируют иерархию, а плановая проекция в виде концентрических структур считается моделью архетипа формирования иерархии. Хорологические и типологические классификации смыкаются в позиции «природная зона» – «материнское ядро» типа природной среды, представляющее зональную норму. Концентрическая модель имеет различные интерпретации – в частности, описывается как система локальных координат, где каждая координата соответствует категориям серийности геосистем, степени их факторально-динамической изменчивости относительно геосистем зонального типа. Прослеживается аналогия между иерархическим строением периодической системы химических элементов и типологической классификацией геосистем, когда периоды системы элементов соответствуют высотным ярусам и широтным поясам размещения геохор или иерархическим уровням классификации геоморфов. Представлены фронтальная развертка и плановая проекция конуса классификации фаций геома Причунского ландшафта южной тайги Средней Сибири по трем базовым категориям изменчивости геоморфов разного уровня.

**Ключевые слова:** иерархическая классификация, периодическая система, типологическое расслоение и слоение, математические модели архетипов, концентрическая модель знаний, гомологические ряды.

**Для цитирования:** Черкашин А. К. Иерархическая классификация географических систем // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 35. С. 125–153. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.35.125>

### Введение

Одна из распространенных форм классификационных построений в систематике объектов и явлений – иерархическая классификация (ИК), отражающая многоуровневую упорядоченность объектов по их особенностям. В иерархии разные объекты последовательно объединяются в разномасштабные группы (слои, страты, ступени, степени, порядки, ранги, градации) по критериям сходства и различия объектов с отношениями вертикального подчинения [Месарович, Мако, Такахара, 1973; Хакимов, 2007]. Общее понятие «иерархическая структура» достаточно формально, не зависит от конкретного содержания многоуровневых систем [Калайджиева, 1983]. Сово-

купность групп (подмножеств) объектов образует иерархическую структуру в форме ветвящегося дерева, листьями (узлами) которого являются эти группы. Причем группы одной ступени не должны пересекаться, т. е. повторяться по категориям признаков. Это означает, что каждый объект может быть отнесен только к одной группе на каждом уровне иерархии, что содержательно и формально связывает эти уровни в вертикальную кодированную конструкцию наследования.

Иерархия – это форма многоступенчатой организации сложных природных и социальных систем, которая опирается на дифференциацию их частей по масштабу проявления [Hierarchy in natural ... , 2006]. В первую очередь рассматривается эволюционная иерархия природы в последовательности роста сложности организации: частицы, атомы, молекулы, вещества, кристаллы, клетки, ткани, органы, организмы, сообщества, геокомпоненты, геосистемы разных уровней и т.д. Принимается во внимание общественная иерархия – человек, семья, сообщества, институты управления, районы, страны, цивилизации, в которой повторяется природный порядок следования. Эти пространственные иерархии должны отражаться в иерархии естественной классификации типов существования систем, где позиция каждого элемента определяет его свойства.

Пространственные и эволюционные последовательности обуславливают индивидуальные и типичные свойства объектов, выраженные в особенностях строения, динамики и функционирования их составных частей (компонентов), что, в частности, прослеживается в общесистемном (комплексном), индивидуальном и типологическом понимании ландшафтов и их подразделений. В этом, в отличие от химической и биологической систематики, проявляются особенности географической ИК, когда не только объекты классификации (участки территории, районы), но и типы объектов-геосистем наглядно представлены в земном пространстве, картографируются, имеют выраженные границы и качества для идентификации, что переносится на ИК их компонентов. Объекты, находящиеся в границах однотипной среды, подчиняются закономерностям свойственного только ей природного режима.

Неважно, с какого уровня объектов и их видов следует начинать классифицировать геосистемы: биогеоценозы (БГЦ), фации, урочища, местности, ландшафты, провинции или страны. В любом случае должны получаться классификации, сопоставимые по географическим грациям порядка [Крауклис, 1977]. Итоговая ИК не должна зависеть от научных методов группирования, используемых натуральных и дистанционных данных, т. е. структура ИК инвариантна частным качествам типов объектов, которые должны логически определяться из ИК путем переклассификации (интерпретации) базовой схемы многоуровневого порядка геотаксонов для решения задач районирования и типологического картографирования с получением отраслевых ИК почв, растительности, экологических, экономических или эстетических свойств, обоснованных географически.

Связь пространственной и типологической иерархии проявляется в рядах классификации геосистем – геохор и геомеров, – смыкающихся на ниж-

нем геоэкологическом уровне непосредственно наблюдаемых переменных состояний (БГЦ) геосистем [Сочава, 1972, 1978]. В географии реализуются две ИК-модели. В одной в соответствии с масштабом упорядочиваются индивидуальные компактные геосистемы (геохоры, гетерогенные ареалы) от БГЦ, фаций, ландшафтов до ландшафтной оболочки в целом. В другой ИК реализуется типологическая схема, где геосистема – разорванный гомогенный ареал разновидностей географической среды (типы БГЦ и фаций, группы и классы фаций, геомы, типы природной среды). Такой подход закреплен в двухрядной ИК геосистем В. Б. Сочавы [Там же]. ИК отражают существующую в природе иерархию подразделений ландшафтной сферы, дают представление о соподчиненных разнокачественных территориях (геохорах) и гомогенных природных целостностях разных рангов (геомеров). ИК геомеров основывается на инвариантах географической среды, связывающих пространственные и временные варианты – переменные (производные) состояния-геосистемы нижележащего уровня. Оба классификационных ряда самостоятельны, но в узловых звеньях масштабных уровней взаимообусловлены – например, классы фаций геома проявляются в границах ландшафта, а классы геомов – в пределах физико-географических областей. Структура геохоры как единицы районирования определяется его геомерным составом [Суворов, 1987; Михеев, 2001]. Географическое положение, связь с конкретным регионом должны учитываться в ИК-моделях геомеров.

Зарубежные исследования в области создания и применения ИК многочисленны (обзор см. [Silla, Freitas, 2011]). Для решения задач ИК используются разные концептуальные подходы, статистические методы, разрабатываются новые алгоритмы [Borges, Silla, Nievola, 2013]. Объектами ИК являются ландшафты в их общем многоуровневом понимании, приближенном к экосистемной трактовке с ориентацией на прикладное использование их природных функций (услуг, полезностей) в различных областях человеческой деятельности [Bailey, 1974; Blankson, Green, 1991; Ecosystem classification ... , 1994; Klijn, Udo, 1994; Lindenmayer, Hobbs, 2007; Yang, Zhang, 2009; A new European ... , 2010; A new landscape ... , 2014; Suitable landscape ... , 2019] обычно в терминах различения особенностей наземного покрова (land-cover) и использования земель (land-use). Иногда изучается и учитывается российский опыт создания ландшафтных классификаций и карт [Klijn, Udo, 1994; Siberian landscape ... , 1996; Wagner, 1997]. Для Европы разработана специальная иерархическая ландшафтная классификация (LANMAP) для 350 видов ландшафтов четырех иерархических уровней как основа организации научных и прикладных работ по охране окружающей среды и землепользованию, что потребовало создания специальной методологии выделения и типологии ландшафтов с последовательным применением различных критериев [A new European ... , 2010].

При реализации процедур классификации и картографирования широко применяются возможности ГИС [Ландшафтно-интерпретационное ... , 2005; Schröder, Pesch, Schmidt, 2007; Brabyn, 2009]. Классификация начинается с формирования базы данных и знаний ГИС и анализа предметной области с

определением оснований деления – категорий признаков классификации. В процедурах ГИС реализуются разные методы классификаций, которые включают схему (ключ) применения набора критериев для отнесения объектов в соответствующую группу (класс). В качестве критериев используют информативные категории сравнительной оценки, в частности градации значений атрибутов географических объектов из базы данных ГИС или состав их таксонов – ранжированный таксономический состав. Всякий объект в идеале характеризуется индивидуальным набором категорий его классификационной позиции, что в традициях российского ландшафтоведения выражено в развернутом названии (описании) типов геосистем в легендах ландшафтных карт.

Первичная ИК осуществляется путем категоризации знаний с формированием общих понятий по образцам (прототипам) или просто делением диапазона значений количественного признака (индикатора) на порядковые классы (категории, индексы). На их основе проводится дифференциация территориальных объектов с картографированием методами ГИС-анализа: SQL-запросов, наложения контуров или алгебры карт. С помощью процедуры «дерево решений» объекты иерархически упорядочиваются по различию категорий (градаций признаков) на каждом шаге алгоритма. Так, например, работают определители растений, животных или почв и могут быть реализованы полевые определители-справочники фаций (типов фаций) и геосистем более высокого ранга. Многомерная кластеризация – метод ИК, построенный на статистическом анализе данных по разным критериям близости признаков объектов [Gordon, 1987; 2019; Kassambara, 2017]. Иерархическая кластеризация создает иерархию кластеров в форме древовидной структуры (дендрограммы), где «корню» дерева соответствуют все объекты, а «листьям» – группы объектов конкретной степени их сходства.

Количественный анализ данных позволяет по разным основаниям построить ИК, недостатком которых является неполное разделение объектов по группам, что обусловлено частичным сходством характеристик объектов в признаковом пространстве. В таких ИК непонятна естественная основа классификации, которая должна быть связана с моделями архетипов объектов – планом их строения, определяющим связи характеристик (типов признаков гомологически сходных частей – меронов), как это хорошо выражено в Периодической системе (ПС) химических элементов Д. И. Менделеева, которая по возможности принимается за образец создания и анализа других классификаций [Mendeleev to oganesson ... , 2018].

ИК – удобная модель систематизации, что отражает естественную иерархию геосистем. Главным преимуществом иерархических методов является ясность, с которой прослеживаются пути наследования от начальных коренных к конечным группам, объясняя появление этих групп [Hierarchical and non-hierarchical ... , 2006] логикой перехода от общего к частному с определением числа и свойств объектов данной группы, а не наоборот, как это делается в статистической кластеризации. ИК характеризуется глубиной (количеством ступеней) и емкостью (полнотой содержания) классификации.

Разрабатываются теоретические и математические основы классифицирования [Mirkin, 1996; Restrepo, Pachón, 2007; Parrochia, Neuville, 2013; Parrochia, 2020], однако конструктивных предложений недостаточно, поэтому так важны примеры решения данной проблемы в различных областях науки, особенно в географии, где создание теории и моделей представления типологических знаний является актуальной задачей. Поскольку ИК проявляется в различных формах [Parrochia, Neuville, 2013; Черкашин, 2020], необходимо логически связать эти формы для понимания соответствия дополняющих друг друга иерархических и неиерархических классификаций на примере решения подобных задач в географии.

### **Основные понятия и модели**

В данном исследовании исходим из понимания того, что теория и модели классифицирования являются одним из аспектов полисистемного множества теорий [Черкашин, 2005, Гомология ..., 2009; Cherkashin, 2009], решающих специальные задачи в системных терминах соответствующей сквозной интертеории, например интертеории динамических или функциональных систем природного, экономического и социального содержания. Интертеоретический статус классификационного подхода означает общность моделей и методов описания реальности в соответствующих понятиях, что требует выяснения оснований этого тематического подхода в различных вариантах его применения.

Классификация – способ систематического упорядочивания данных и знаний об объектах реальности, в котором таксономическая позиция определяется и определяет свойства объектов данного типа (таксона). Классификация признаков объектов по категориям называется мерономией, объектов по типам – таксономией. Выделение и отнесение объектов к определенному типу считается типологией (распознаванием, идентификацией). Классификация – задание структуры связи различных типов (таксонов) в виде графа, узлами которого являются одно- и разноранговые таксоны, а ребра-стрелки задают их отношения. Система связи меронов соответствует архетипу – плану строения и минимальной модели объектов классификации данной предметной области. Сама классификация и соответствующий ей архетип являются структурно-инвариантными, не изменяются во времени, так что динамика и эволюция становятся реализацией случайного блуждания или направленного изменения таксономической позиции объектов в структуре классификации. В этом смысле ИК – это устойчивая перечислительная классификация, когда все возможные классы заранее перечислены и делятся в зависимости от выбранных оснований на подклассы по схеме перехода от общих таксонов к частным. Такие ИК должны обладать свойством полноты, т. е. любому объекту предметной области должна соответствовать классификационная позиция в ИК. Незанятая ИК-позиция означает, что объект данного вида может существовать, его можно найти или он должен появиться. Категоризация меронов и квантификация таксонов решается как задача на собственные числа математических уравнений модели архетипа,

так что в классификации таксоны естественным образом организуются в ряды категорий квантованных данных и знаний [Черкашин, 2020]. Последовательность таксонов формирует ряды гомологии и аналогии. В ПС гомология химических элементов проявляется в периодах, а аналогия – по столбцам (группам), определяющим основные физико-химические свойства, в чем выражается принцип периодичности. И. Н. Вавилов сформулировал закон гомологических рядов организмов, согласно которому их генетически близкие виды и роды характеризуются сходными рядами наследственной изменчивости, поэтому, зная ряд форм одного вида или рода, можно по аналогии предвидеть наличие параллельных форм у других [Розенберг, 2000; Васильев, Васильева, 2009]. Ряды, построенные по признакам аналогии или гомологии, в которых каждой позиции можно сопоставить число (порядковый номер, индекс), называются гомотопическими последовательностями (рядами) [Гомология ... , 2009], например, гомологические ряды химических веществ. В науке такие ряды связаны с понятием «серийность» (seriation, seriality) – в данном случае это периодичность, последовательность, упорядоченность явлений в серию по определенному фактору или степени его проявления: литоморфность, гидроморфность, эффективность, производительность, людность.

Выделяются иерархические и неиерархические классификации. К неиерархическим отнесены типология, структурная классификация и стратификация [Mirkin, 1996]. Типология формируется в виде одного категориального ряда или в виде комбинации категорий нескольких рядов; в последнем случае ее называют фасетной. Структурная плоскостная классификация соответствует сети одноуровневых объектов, например, в форме производственных связей разных отраслей хозяйства или институтов власти или межличностных отношений людей с различными возможностями. Стратификация принимает во внимание неравенство возможностей (профессиональных, финансовых, социальных, властных). Она отражена в ранговых распределениях элементов систем по встречаемости или значимости, например, в упорядоченности городов по численности населения («ранг — размер») или фаций по площади в границах ландшафтного района. Химический состав вещества в ранговой формуле дается последовательностью символов химических элементов в порядке снижения их атомных содержаний:  $OSiAlNa$ ,  $OSiAlMg$  – ранговые формулы, например, группы алюмосиликатных пород [Петров, 2009; Петров, Краснова, 2010].

Такое разделение основано на существовании общенаучной оппозиции иерархии и неиерархии в природе и обществе [Хакимов, 2007]. Результатом этого становится формирование иерархической структуры мира из неиерархической замкнутой сущности – в науке путем восхождения от абстрактного к конкретному знанию, от модели архетипа к типологии и классификации. Вертикальная иерархия систем дополняется неиерархической горизонтальной сетевой организацией [Сергеев, Сергеев, 2003] – гетерархией, основанной на координации связей.

Иерархия изображается в виде пирамиды, где высота положения определяет число охваченных элементов, важность и масштаб влияния сверху

вниз и в стороны. В основании пирамиды, на элементарном уровне иерархии представлены части системы, что последовательно объединяются в иерархическую организацию. Накопленная информация выступает сетью взаимосвязанных пирамид знаний [Minto, 2009], представление и извлечение которых осуществляется посредством дедуктивных и индуктивных рассуждений и по аналогии, с использованием общих правил классифицирования. Это напоминает процессы, формирующиеся в горах, где на склонах возникают последовательно геохимически связанные геосистемы-катены в виде гомотопических рядов по показателю высоты местоположения. Эти процессы и явления подчинены высотному нивально-гляциальному ядру, выполняющему средообразующие функции в ландшафте. Также вокруг городских центров организуется периферия региона (экономический ландшафт). Это учитывается в классификации ландшафтов А. Г. Исаченко [1985], где структура видов ландшафтов изображается в форме треугольных пирамидок-символов гор с несколькими ступенями (ярусами) от высокогорных снегов до равнинных лесных и степных ландшафтов. Есть аналогия между высотной и широтной дифференциацией и соответствующей типизацией с переходом от ледяных пустынь до экваториальных лесов, обусловленных рельефом и формой Земли.

Гора – естественный географический образ ИК в виде прямого кругового конуса, или перевернутого графа-дерева с вершиной и подножием (основанием) из всех элементарных таксонов (типов БГЦ, фаций и т.д.). Методами начертательной (описательной) геометрии, основы которой были разработаны для отображения земного рельефа при строительстве, пространственную фигуру (конус) можно представить проекциями на три плоскости – вертикальные профильную и фронтальную (фасад) и горизонтальную (план) (рис. 1), а затем восстановить ее по проекциям [Короткий, Хмарова, Буторина, 2014]. В плановой проекции прямой конус высотой  $H$  и радиусом основания  $R$ , пересеченный горизонтальными плоскостями уровней, выглядит как концентрическая модель (концентр) типа нуклеарных геосистем – хорионов [Ретеюм, 1988], состоящих из ядра и окружающих его геополей. В такой проекции, выполненной отвесными линиями, это система вложенных окружностей с общим эпицентром (ядром) вида плана местности. Развертка конуса состоит из сектора круга радиусом  $H$ , соответствующего боковой поверхности конуса, и примыкающего круга его основания.

В качестве рельефа (скалярного поля интегральных оценок) рассматривается многообразие форм в различных координатных пространствах, например экономический или эпигенетический рельеф, поэтому идеи начертательной геометрии можно применять в разных вариантах проекционного анализа. Для таксономического изучения особенно важен картографический образ объектов в плане его проекции на горизонтальную плоскость (см. рис. 1). Примером может быть схема геологического архетипа «Земля в разрезе», где внутреннее ядро планеты последовательно окружено сферами разной мощности, включая ландшафтную оболочку. Во внешней каменной оболочке (земной коре) сформированы геологические образования, в

плане выглядящие как кольцевые структуры центрального типа. Особо выделяются крупные кольцевые структуры (концентры, нуклеары) размером в сотни и тысячи километров [Михеев, 1987].

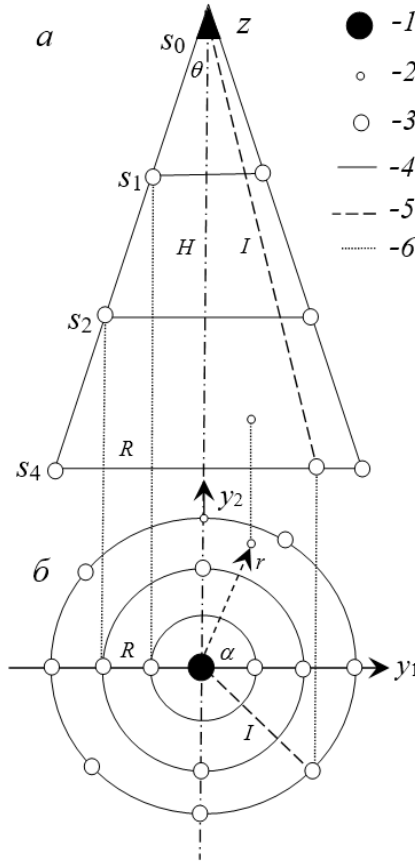


Рис. 1. Вертикальная *a* (фасад) и горизонтальная *б* (план) проекции иерархического конуса и его элементы и связи: 1 – материнское ядро (общий эпицентр); 2 – точки поверхности конуса; 3 – производные состояния; 4 – линейные элементы конуса; 5 – образующая *I*; 6 – вертикальные проекции (отвесные линии);  $s_0-s_4$  – разноуровневые сечения конуса;  $y_1, y_2, z$  – оси декартовой системы координат;  $\alpha, r$  – полярные координаты;  $R$  – радиус основания;  $H$  – высота конуса;  $2\theta$  – угол раствора конуса

Вложенные окружности напоминают планетарную модель атома Э. Резерфорда, которая использовалась Н. Бором для обоснования эффектов квантования и строения ПС химических элементов. В основе расчетов лежит трехмерное волновое стационарное уравнение Гельмгольца, которое описывает установившиеся периодические колебания определенной частоты [Черкашин, 2020]:

$$\Delta\psi(r) = -k^2(r)\psi(r), \tag{1}$$



где  $\psi(r)$  – стационарная волновая функция в векторно-координатном представлении  $r = (x, y, z)$ ;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $k(r)$  – функция, связанная с потенциалом волнового поля. Это уравнение можно считать обобщенной математической моделью архетипа, определяющей ИК-строение ПС по результатам решения задач на собственные (квантовые) числа.

Проекционные построения в плане широко используются для визуализации связей данных и знаний. Наиболее известная из них – коническая картографическая проекция Земли. Дендрограмма кластеризации представима диаграммой вложения изолиний показателей разного уровня сходства типизируемых объектов (вложенные кластеры). Аналогично строятся древовидные карты (tree-map) в виде набора вложенных цветных прямоугольников [Shneiderman, 1992]. Проекция осуществляется не только на плоскости, но и на любые поверхности (многообразия, упругие карты) [Зиновьев, 2000]. Радиальное дерево, или радиальная карта, – это способ отображения древовидной структуры на плоскости с расширением в радиальном направлении, где каждый последующий уровень узлов отображается на новой внешней орбите. Так представляют, например, эволюционное дерево живых организмов или степень факторальной изменчивости фаций в структуре эпифаций геоба или типа природной среды [Крауклис, 1979].

Концентр – наглядное выражение иерархии освоения знаний или организации жизнедеятельности. В социальной теории экологических систем [Bronfenbrenner, Morris, 2006] становление личности прослеживается на фоне влияния разноуровневой общественной среды. Эта теория различает поведение в средах пяти уровней. Каждая из окружающих сред предлагает своеобразные варианты и источники роста. Ядром концентра считается человек. Такая модель отличается от схемы, где работа всех сфер жизнедеятельности подчинена общественным интересам. Это напоминает ранжирование геосистем горных ландшафтов или городов в системе расселения. В горных ландшафтах доминирующим звеном являются высокогорные участки, а долинные местности, близкие по характеристикам к зональным условиям, находятся в подчиненном положении. Вместе с тем в ИК за основу принимаются зональные геосистемы, а связанные с ними азональные образования объединяются в тип природной среды [Сочава, 1978].

Понять и объяснить такую двойственность в организации иерархических систем удобно с позиций факторального подхода к анализу их пространственно-временной изменчивости (рис. 2). Рассматриваются геологические факторы, влияющие на процесс рельефообразования в географическом цикле Дэвиса с эндогенным тектоническим поднятием и опусканием земной поверхности и экзогенным процессом эрозионного выравнивания рельефа. Величина фактора деформации поверхности  $x$  рассчитывается относительно базиса эрозии  $x_0$  равнинных территорий с ландшафтами зонального (коренного) типа (зональной нормы)  $y = x - x_0$ . Функция  $f(y) = ay$  определяет степень и направление изменений рельефа (серийность по разным факторам), сначала контрастного в виде гор  $f(y) > 0$  и впадин  $f(y) < 0$ , а затем денудационного  $f(y) = 0$  на равнинах.

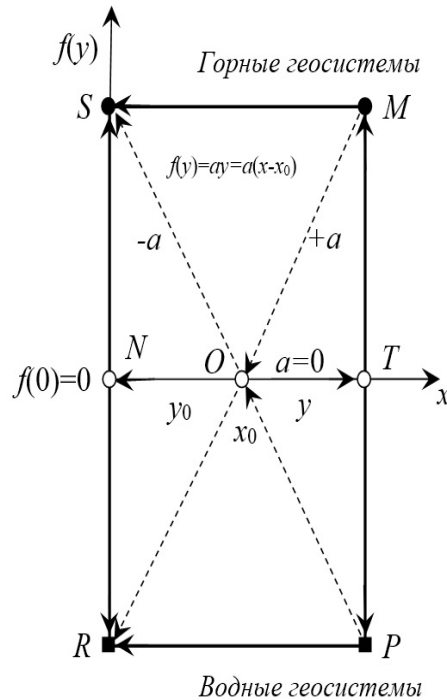


Рис. 2. Схема моделей географического цикла и иерархической классификации, построенных вокруг эквифинального состояния равнинных территорий зональной нормы  $O$  (пояснения в тексте)

Механизмы преобразования ландшафтов и формирования региональных ландшафтных рубежей напрямую связаны с блоками земной коры [Снытко, Коновалова, 2015]. Например, Байкало-Джугджурская горно-таежная физико-географическая область соответствует территории новейших сводовых поднятий разных по возрасту древних структурных элементов и накоплению осадочных пород по образовавшимся межгорным впадинам и разломам. Ландшафты Средней Сибири формировались в условиях медленного неотектонического поднятия земной коры и активной денудации, что привело к появлению возвышенности с разветвленной речной сетью. При преобладании процессов разрушения и денудации над темпами тектонического поднятия происходит постепенное снижение относительных высот  $f(y)$  и общее выравнивание рельефа. Западносибирские ландшафты в основном приурочены к низинным равнинам, сформировавшимся на эпигерцинской платформе с опусканием (океанизацией) обширных пространств и формированием мощного чехла рыхлых морских и континентальных пород.

Степень и направление геологической трансформации зависят от величины факторной нагрузки  $a$ . При  $a > 0$  идет процесс горообразования, при  $a < 0$  – формирование впадин и разломов,  $a = 0$  – поддерживается режим выравнивания рельефа с образованием ландшафтов зонального типа на равнинах  $f(y) = 0$  без выраженных тектоно-магматических преобразований.

Структура и механизм изменения горного массива на рис. 2 представлены треугольником  $MTO$ , когда при снятии факторной нагрузки по направлению  $MO$  идет процесс пенеппенизации – выравнивания рельефа и формирования равнин (эквифинальное состояние  $O$ ,  $y = 0$ ,  $f(0) = 0$ ). В пространстве  $MPTO$  строится иерархическая хорологическая модель рельефо- и ландшафтообразования и зеркально ей возникает типологическая модель дифференциации земного пространства  $SNRO$ . Обе модели смыкаются в точке  $O$ , соответствующей равнинным территориям с геосистемами зонального типа. Таксономическая иерархия  $OSN$  строится с верхней позиции  $O$  типа природной среды до локальных геомеров – типов фаций  $SN$  разной степени проявления видоизменяющего воздействия факторов  $f(y)$  (серийности). На каждом уровне по линии  $ON$  представлены коренные структуры, а по направлению  $SN$  – их серийные состояния; все индуктивно связаны с материнским ядром  $SN \rightarrow ON \rightarrow O$ . Это определяет дедуктивную схему классифицирования  $O \rightarrow ON \rightarrow SN$ : разбиение и упорядочивание по иерархии всего множества фаций по их связи с коренными геомами разных таксономических уровней и с материнским ядром зонального типа природной среды.

Двойственность хорологического и типологического подходов определена антисимметрией функциональных связей  $f(y) = ay \rightarrow f(y) = -ay = a(x_0 - x) = ay_0$ , где  $y_0$  – степень отклонения характеристик местной среды от показателей зональной нормы  $x_0$ . Это означает, что в геохорах отклонение факторного влияния  $y$  исчисляется от постоянной нормы  $x_0$ , а для геомеров меняются сами характеристики среды  $x_0$  на величину  $y_0$  по иерархии категорий факторной трансформации  $y_0$  от коренных зональных до локально-серийных факторальных. Классифицируются не натурные геосистемы, а разновидности географической среды: сходство справедливо только для восстановленных геосистем, соответствующих своей среде  $y = y_0$ , что наглядно определяется симметрией модельных треугольников  $MTO$  и  $SNO$  относительно точки  $O$ .

### Модели иерархии и их свойства

Конус интересен с точки зрения топологического и количественного анализа иерархически устроенных систем. Поверхность конуса – это линейчатая поверхность, формирующаяся движением образующей линии  $I$  (см. рис. 1), когда один конец отрезка проходит через вершину конуса, а второй скользит по окружности. В систематике образующая символизирует связь высшего таксона (материнского ядра) со всеми таксонами разных уровней. Если фигура основания – точка, то конус выглядит как отрезок линии, связывающий точку и вершину; если отрезок, то конус похож на треугольники на рис. 2; если многогранник, то получается пирамида, в частности треугольная пирамида (тетраэдр, симплекс). В плановой проекции горизонтальные сечения прямого кругового конуса дают множество вложенных кругов или окружностей. Однако такую проекцию имеют и другие пространственные фигуры [Короткий, Хмарова, Буторина, 2014], например шар, поэтому существует аналогия между высотно-ярусной и широтно-поясной

дифференциацией геосистем, например, в ПС природных зон А. А. Григорьева и М. И. Бudyко [1956].

Концентрическая структура плана строения рассматривается в качестве метамодели архетипов классификации разных объектов. Она может быть построена не только на плоскости, но и в многомерном пространстве характеристик объектов. Модель атома реализуется в трехмерном пространстве, значит, конусообразная надстройка ИК должна быть похожа на четырехмерную сферу. Если модель имеет вид тетраэдра, то классификация должна выглядеть как четырехмерный тетраэдр-симплекс в пространстве, большем на одну размерность. В этой последовательности размерностей проявляется своя иерархия сложности организации пространства [Короткий, Хмарова, Буторина, 2014].

Алгебраически конус  $K$  обладает структурой подобия  $K = \gamma K$ , в соответствии с которой все конусы с одинаковым углом раствора  $2\theta$  при вершине конуса независимо от размера сравнимы. Это значит, что базовая схема классификации должна повторяться во всех масштабах. Конус наглядно моделирует свойства сжатия и расширения пространства, когда основание перемещается к вершине и от нее – своеобразные центростремительные и центробежные процессы и явления. Расширение прослеживается во влиянии высокогорных узлов и массивов на подлежащие склоновые, подгорные и равнинные местоположения. Сжатие (концентрацию) наблюдаем в иерархии водотоков в структуре речной сети и в формировании стока на водосборах. Сжатие демонстрируется в концентрации информации при индуктивном переходе от частных признаков к общим в классификационных построениях, расширение – при дедуктивном выводе частных свойств из верхнего уровня ИК.

Конус может рассматриваться как пучок-конгруэнция образующих линий, проходящих через одну точку и направляющую кривую, например окружность. Получившаяся фигура состоит из двух полостей (конусов) наподобие песочных часов. Продолжение конуса вверх – это совокупность событий и причин, которые по иерархии мироздания влияют на ядро системы. В планетарной модели атома не учитываются внутреннее строение ядра и существование множества элементарных частиц. За типами природной среды стоит влияние земного и внеземного факторного пространства на зональные характеристики. В упомянутой модели экосистемы становления человека в равноуровневом окружении подразумевается, что внутренне сам человек состоит из органов и тканей, молекул и атомов, что в меньшей степени влияет на его жизнь через здоровье, наследственность и т. д. Местом пересечения внешних и внутренних причин в географии (см. рис. 2, двуполостной конус  $SNOMT$ ) считается равнинная территория природной зоны (т.  $O$ ), являющаяся геохорой и геомером.

Уравнения боковой поверхности и основания прямого кругового конуса в декартовой  $(y_1, y_2, z)$  и полярной  $(\alpha, r)$  системах координат (см. рис. 1) выглядят так:

$$z = H - r \operatorname{ctg} \theta = H - \sqrt{y_1^2 + y_2^2} \operatorname{ctg} \theta, y_1 = r \cos \alpha, y_2 = r \sin \alpha, r^2 = y_1^2 + y_2^2. \quad (2)$$

При  $\alpha = \omega t$  изменение  $y_1$  и  $y_2$  по параметру  $t$  напоминает установившиеся волновые колебания с частотой  $\omega$ , где  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$  удовлетворяют уравнению (1) при замене  $r \rightarrow t$  и  $k = \omega$ .

В связи с этим структура ИК похожа на волновой процесс, поскольку каждая таксономическая позиция разбивается на несколько субпозиций таксонов нижнего уровня, каждый из которых раскрывается через дробные типологические категории. Это выглядит как реализация принципа Гюйгенса: каждая точка поверхности фронта, достигнутая волной, является новым (вторичным, производным) источником волн; огибающая фронтов волн всех вторичных источников становится новым фронтом волны (рис. 3). Доказано, что требованию, выраженному в принципе Гюйгенса, удовлетворяют только волновые уравнения, имеющие нечетное число пространственных переменных  $n = 3, 5, 7$  [см. Грюнбаум, 1969, с. 425–426]. Эта модель сопряжена с иерархией трех и более локальных координат на каждом уровне ИК (см. рис. 3). Каждой позиции соответствует стрелка-координата и категория оценки. При трихотомическом делении в волновом процессе формируется треугольник классифицирования. Его многоуровневая волновая структура моделирует иерархию географического круговорота геосистем всех размерностей, включая цикличность регионального и планетарного масштаба.

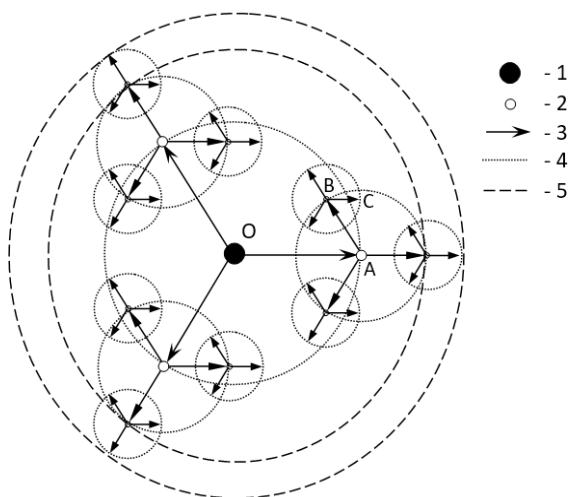


Рис. 3. Волновая модель архетипа иерархической классификации:  
 1 – ядро; 2 – производные позиции; 3 – локальные координаты разного уровня;  
 4 – распространение волн от вторичных источников; 5 – фронты волн;  
 O, A, B, C – уровни ИК

Согласно уравнениям (2) волновой процесс выражается в повороте радиус-вектора  $r$  (см. рис.1) на угол  $\alpha$  против часовой стрелки. Это позволяет связать локальные координаты с позициями поворота – вершинами треугольника или точками на единичной числовой окружности (рис. 4, a). Такие точки координируются комплексными числами  $u_{nm}$  – корнями  $n$ -й сте-

пени из 1:  $u_{nm} = \sqrt[n]{1} = e^{im/n} = \cos 2\pi m / n + i \sin 2\pi m / n, m = 0, 1, 2, \dots, n-1, i = \sqrt{-1}$ . В данном случае  $n$  – размерность таксономического пространства, число таксонов на каждом уровне,  $m$  – порядковый, гомотопический номер таксона в ряду кручения. Поскольку  $u_{nm}$  связаны с характеристическими корнями  $K_{nm} = ku_{nm}$  дифференциального уравнения  $d^3 y_1 / dx^3 = k^3 y_1(t)$ , имеется возможность сопоставить всякой классификационной позиции математическую модель описания процесса или явления.

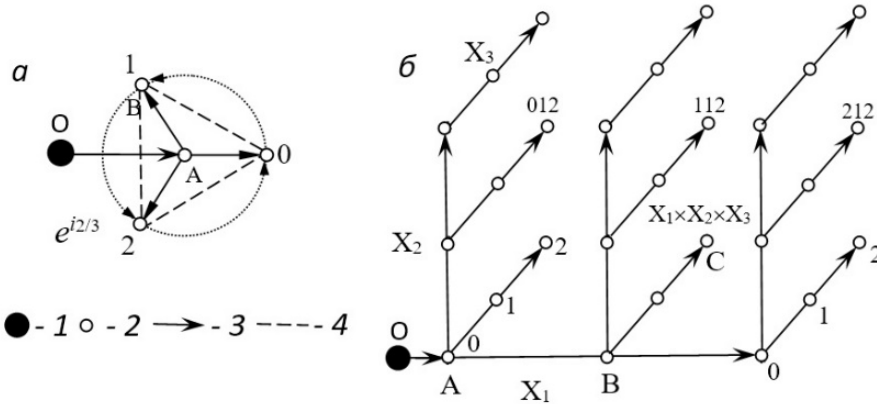


Рис. 4. Перевод иерархической волновой модели а (см. рис. 3) в координатную б: 1 – ядро ИК; 2 – производные таксономические позиции; 3 – локальные координаты; 4 – стороны треугольника; 0, 1, 2 – значения на числовой окружности и в координатном ряду;  $X_1, X_2, X_3$  – разноуровневые координатные ряды; 212 – кодирование позиции

Обычно ИК воспроизводят в виде ветвящегося дерева, но в данном случае она выглядит как координатная система (рис. 4, б), где позиции окружности разворачиваются в координатный ряд  $X_j (j = 1, 2, 3)$ , индивидуальный для каждого таксона ( $j$ ) вышележащего уровня. Это можно проследить на примере последовательности ОАВС на рис. 3 и 4. Формально координатная система описывается декартовым произведением различных гомологических рядов  $X_1 \times X_2 \times X_3$  (см. рис. 4, б), внутри каждого из которых  $X_j$  существует линейный порядок по номеру  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Число позиций  $n$  в этой последовательности соответствует размерности категориального пространства представления данных, которая, как указано, может быть равна 3, 5 и 7. Получается, что всякую ИК можно представить как фасетную структуру, реализующую комбинаторный метод кодирования по уровням, а значит, и как последовательность в виде числа соответствующего счисления. Если на каждом уровне  $X_j$  имеется одинаковое число элементов, то такая ИК называется гнездовой классификацией, которая выглядит как многомерный куб (см. рис. 4, б). В итоге получается, что ИК – это ранжированный набор категорий меронов и таксонов, где категории мерона представлены квантовыми числами координатного ряда, а таксон – последовательностью таких чисел разных рядов (кодом).

Ф. Н. Мильков [1984] обращал внимание на важность использования правила триады в физической географии, согласно которому различаются крайние (окраинные, противоположные) позиции и срединная позиция, наиболее полно отражающая характерные черты объекта или явления ( $n = 3$ ). Например, на высшем таксономическом уровне ИК геосистем В.Б. Сочава выделяет три свиты северных внетропических континентальных, южных внетропических океанических и тропических типов природной среды, соответствующих трем основным широтным поясам [Сочава, 1978]. Он также ввел три динамические категории для обозначения групп фаций — коренные, мнимокоренные и серийные геосистемы. Триадный подход имеет философскую в диалектике и математическую в теории категорий интерпретацию. Эти отношения единства противоположностей преобразуются в гомолого-гомотопический ряд трансформаций  $0 \rightarrow 1 \rightarrow 2$  (см. рис. 4) [Гомология ... , 2009]. Начальная (коренная) позиция 0 всегда находится на образующей  $I$  (см. рис.1 и 3), от которой по кругу (циклу) воспроизводятся производные состояния. Географический цикл развития рельефа суши заключается в последовательной смене трех стадий: юности (2), зрелости (1) и старости рельефа (0). По уровню экономического развития страны делятся на развитые (0), развивающиеся (2) и страны с переходной экономикой (1). В таких гнездовых ИК таксономическая позиция кодируется третичным числом из трех цифр (0, 1, 2), например 012 (см. рис. 4, б). Возможно большее число координат (5 и 7) при выделении между основными (0,1,2) промежуточных категорий, таких как полукоренные или полусерийные фации [Крауклис, 1979].

Из циклов получаются гомологические ряды иерархии – например, горные системы разной экспозиции определенного яруса или природные зоны одного широтно-климатического пояса. Понятно, что длина этих рядов неодинакова: наибольшее разнообразие элементов наблюдается в лучших природных условиях. Это общая закономерность, что прослеживается в различных систематиках. В частности, биологическое правило Виллиса утверждает, что больших родов по численности видов заметно меньше, чем родов с одним или несколькими видами. Аналогично: больших городов меньше, чем малых (правило «ранг – размер»).

Наглядно эта закономерность прослеживается в ПС химических элементов, которая представляет собой треугольную пирамиду (тетраэдр) иерархического порядка [Черкашин, 2020] вида  $P = N \times L \times M \times \Omega$ , где  $n \in N = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]$  – главное квантовое число, номер периода;  $l \in L = [0, 1, \dots, n-1]$  – орбитальное квантовое число, определяющее дифференциацию по блокам элементов и обозначаемое буквами  $[s, d, p, f]$ ;  $m \in M = [0, \pm 1, \dots, \pm l]$  – магнитное квантовое число, задающее место элемента в периоде и в блоке;  $\sigma \in \Omega = [-1/2; +1/2]$  – спин. Выстраивается иерархия элементов по схеме  $n \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow \sigma$  с дихотомическим делением по  $\sigma$  на концах цепи. Абсолютное и относительное положение элемента в иерархии описывается его электронной конфигурацией, например: кислород  $O 1s^2 2s^2 2p^4$ ,  $[He] 2s^2 2p^4$ , где цифры – числа  $n$ , буквы –  $l$ , верхние индексы зависят от кода  $(m, \sigma)$ ; сумма ин-

дексов равна номеру элементов. В ПС в гомологическом ряду второго периода, следующего за гелием He, кислород O (порядковый номер 8) занимает  $2 + 4 = 6$ -е место, определяющее его свойства. В сечении тетраэдра  $P \rightarrow N$  на уровне  $n$  находится место для  $(2l + 1) \times 2$  видов химических элементов  $M \times \Omega$ . На примере ПС видно, что длина координатных рядов  $[m, \sigma] \in M \times \Omega$  зависит от кодовых чисел более высокого уровня ИК  $l = n - 1$  и  $n$ . Это значит, что в координатной системе (см. рис. 4, б) для  $P = N \times L \times M \times \Omega$  необходимо брать длину координационного ряда не 3, а 7 и в конкретных случаях укорачивать его в зависимости от кода верхнего уровня  $l(n)$ ,  $m(l)$ . Иерархия ПС  $n \rightarrow l \rightarrow m \rightarrow \sigma$  согласно схеме рис. 2 соответствует факторальной последовательности категорий «широтность – секторность – ярусность (по высоте и глубине) – экспозиционность».

### Математическое моделирование

Основные положения ИК формулируются в терминах расслоения и слоения многообразий [Черкашин, 2005, 2020]. Расслоением называется отображение  $\pi: X \rightarrow B$  множества элементов (пространства)  $\xi \in X$  на множество элементов  $b \in B$ . Обратное отображение  $\pi^{-1}: B \rightarrow X$  выделяет в  $X$  элементы типа  $b \in B$ , формируя из  $X$  расслоенное пространство  $Y = \{X_b\}$  (типологию), состоящее из непересекающихся слоев  $X_b \in X$ , объединение которых при полноте набора  $B$  покрывает пространство  $X$ , например, типизация участков ландшафта  $\xi \in X$  с выделением ареалов  $X_b \in X$  разных геомеров  $b \in B$  и отображение их на ландшафтно-типологическую карту. Система связей типологических единиц формирует из элементов  $b \in B$  систему классификации [Черкашин, 2020]. В ИК элементы любого уровня, относящиеся к одному вышестоящему таксону, образуют слой расслоения таксонов на множестве таксонов более высокого ранга. Процедура расслоения, многократно повторяясь, порождает иерархическую многомерную структуру.

Расслоением над многообразием (поверхностью) называется четверка  $(X, M, \pi, T)$ , где  $X$  – пространство расслоения,  $M$  – многообразие, база расслоения с непрерывной топологией. В данном случае проекция  $\pi: X \rightarrow M$  ставит в соответствие каждой точке  $b \in M$  касательный слой  $X_b = T_b M \subset TM = Y$  – касательную (гипер)плоскость  $T_b M$  к поверхности  $M$  в точке  $b$ . Многообразие  $M$  понимается как многообразие географической среды, а слой соответствует геосистемам разного типа  $b$ . Пространство  $T \sim T_b M$  называется типичным слоем расслоения, образующим расслоенное пространство  $TM = M \times T$  в форме прямого произведения (тривиального расслоения). Типичный (общий, модельный) слой  $T$  расслоения является эталоном моделей архетипа (метамоделью), что индуцируется в других слоях  $T_p M$ . Каждый слой обладает системой локальных координат  $y = \{y_j\}$ , в которой формируются концентрические модели (см. рис. 1, б) структур и функций разного вида, являющиеся надстройками (см. рис. 1, а; 2) над концентрическими, лежащими в плоскости слоя. Многократное расслоение воспроизводит иерархическую структуру  $M \times T_1 \times T_2 \times T_3$ , раскрывающую иерархическое строение географической среды  $T_1 \times T_2 \times T_3$  в виде конуса с основанием  $T_1$ , образующей  $T_2$  и сечениями  $T_3$



(см. рис. 1; проекция множества окружностей  $T_3$  на основание конуса порождает концентр).

На открытом многообразии  $M$ , помимо касательного расслоения, может быть сформировано слоение размерности  $m$ , определяющее членение пространства  $M$  размерности  $n$ . Например, слоение размерности 1 – это разбиение  $M$  на непересекающиеся подмножества  $s_b$ , которые локально выглядят как поверхности уровня гладких регулярных функций  $f(y)$  (см. рис.1). В частности, поверхностями уровня являются линии уровней высоты рельефа (изогипсы), отображаемые в плоскости топографической карты. Эти изолинии не пересекаются (расслоены), полностью покрывают  $M$  и определяют его топологический базис. Все изолинии образуют гомотопический ряд по высоте сечения. Иллюстрацией слоения являются горизонтальные сечения  $T_2 \times T_3$  конуса. Этот пример также показывает, что любое локально тривиальное расслоение  $\pi: T_2 \times T_3 \rightarrow T_2$  можно рассматривать как слоение. Теория слоений разрабатывает методы качественного (топологического) исследования, а теория касательного расслоения предлагает количественные методы исследований и моделирования.

Особенностью функции  $F(x)$  поверхности многообразия является ее локальное подобие функциям  $f(y) = F(x) - F(x_0)$  касательного слоя к точке  $(x_0, F(x_0))$  при  $x_0 = \{x_{0j}\}$ ,  $y = x - x_0$ . В этом случае для каждого слоя справедливо универсальное уравнение

$$f(y) = \sum_j a_j y_j = \sum_j \frac{\partial f}{\partial y_j} y_j, \quad (3)$$

где  $a = \{a_j\}$  – ковектор силы влияния факторов  $y = \{y_j\}$  (факторная нагрузка). Выражение можно рассматривать как линейное алгебраическое или дифференциальное уравнение оценочной функции  $f(y)$  нескольких  $n$  переменных  $y_j$ . Эта функция выражает расстояние (метрику) между точкой касания  $x_0$  и производной точкой в слое  $x$ . Аналогичные функции используются в кластерном анализе в качестве мер сходства. Данная функция однородна, т. е.  $f(ty) = tf(y)$  – ее величина зависит от масштаба  $t$  и направления  $\pm t$ . В случае одной переменной функция  $f(y)$  равна  $f(y) = ay = a(\pm y) = \pm a(x_0 - x)$ , что представлено на рис.2.

Уравнение конуса (2) соответствует этой особенности

$$f(y) = z - H = \sqrt{(ty_1)^2 + (ty_2)^2} = t\sqrt{y_1^2 + y_2^2}.$$

Слоение функции  $f(y)$  удовлетворяет условию  $f(y) = h_i = \text{const}$ . Пример – горизонтальные сечения конуса  $f(y)$  на расстоянии  $h_i$  от вершины. В кластерном анализе сечение меры сходства объектов выделяет объекты определенного уровня иерархии, которые картографируются [Siberian landscape ... , 1996]. Функция (3), как всякая линейная функция, обладает иерархией, т. е.  $y(z)$  – зависимость от частных переменных  $z = \{z_j\}$  – также удовлетворяет соотношению (3) [Черкашин, 2005]. А. А. Крауклис [1979] построил многомерную модель ординации фаций ландшафта в виде трехмерной системы координат, где началом координат (0) являются плакорные фации, проявля-

ющие региональные и зональные черты  $x_0$ , а координатным осям соответствуют комплексные факторы  $y(z) = x(z) - x_0$  – литоморфность, гидроморфность и криоморфность. Отдельная фация в этой системе определяется многофакторной функцией  $f(y(z))$  смещенных относительно 0 координат  $y(z)$ .

С помощью набора функций  $f(y)$  по формуле (3) обеспечивается преобразование  $y \rightarrow f(y)$  – переход от исходных  $y$  к новым независимым координатам  $f(y)$ , две из которых лежат в касательной плоскости. Так получается, в частности, по методу главных компонент, когда типологическое разделение объектов в первую очередь происходит в плоскости векторов двух первых главных компонент. Для точного решения любой задачи необходимо переходить от исходных коррелированных показателей  $y$  во внутреннюю систему независимых координат каждого слоя. Таким координатам придается обобщенный факторальный смысл.

### Примеры реализации классификации

Особенностью структурно-динамического подхода в географии является варьирование геосистем от места к месту в результате их факторной трансформации. Систематизация типологических единиц – геомеров проводится на основе представления о факторально-динамических рядах [Сочава, 1978], где под динамикой понимается появление и снятие факторной изменчивости (серийности  $f(y)$ ) (см. рис. 2). Таксономический аспект ИК заключается в отражении иерархического взаимодействия типов геосистем, что приводит к необходимости выявления зонально-региональной нормы, образца – фации, в которой все свойства имеют оптимальное для данного ландшафта соотношение. В ИК сначала объединяются геомеры одного ранга, представляющие различные устойчивые модификации (видоизменения, факторные деформации) геомеров зональной нормы, т. е. в наибольшей степени отражающие зональный фон и сбалансированные по компонентам: коренные плакорные геосистемы на приводораздельных выположенных хорошо дренируемых участках, которые легко выделяются на местности. Предварительное выявление фаций зональной нормы позволяет определить, к какому зонально-региональному таксону (ядру) относится ИК-схема упорядочения дробных геосистем.

В факторально-динамических рядах выделяются три базовые категории изменчивости: коренные (с кодом 0), мнимокоренные (1) и серийные (2) фации [Сочава, 1978]. В ландшафте коренные фации соответствуют плакорным местоположениям, где они в «чистом» виде отражают зональные черты ландшафтной среды. Серийные фации отличаются быстрыми и необратимыми сменами состояний.

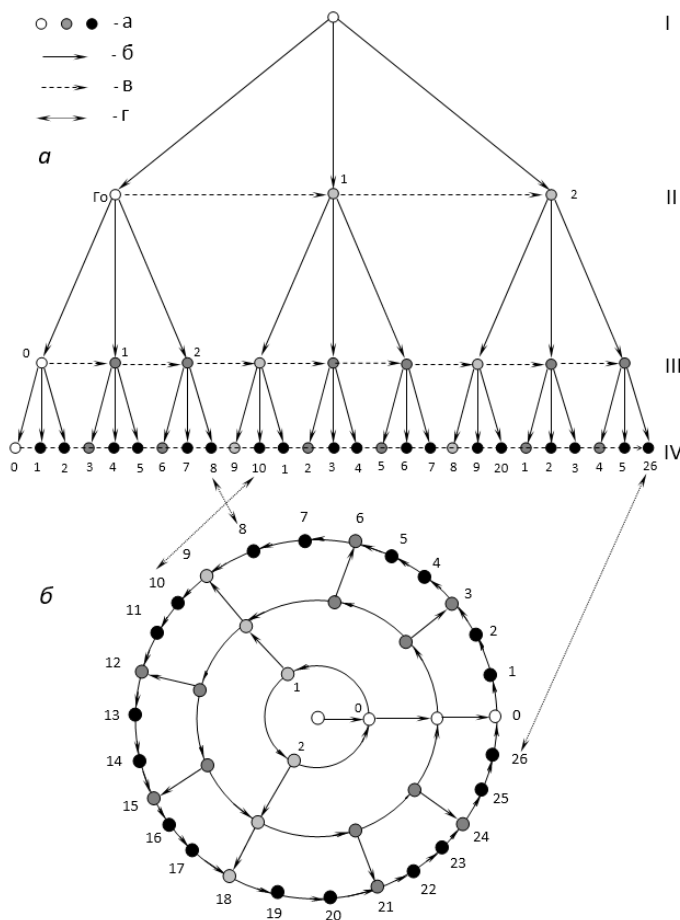
На каждом уровне иерархии геосистем есть три аналогичные категории гомологического ряда факторально-динамической изменчивости, которые также можно назвать коренными (0), мнимокоренными (1) и серийными (2). Например, в горно-таежных провинциях с высотной поясностью группы таежных фаций объединяются в три категории: оптимального (0), ограниченного (1) и редуцированного (2) развития [Михеев, 1987]. Они выражают

степень проявления зональных черт в геосистеме и одновременно степень отклонения их от коренного состояния ( $y = 0$  – нет отклонений). Зональные черты отражены в фациях геома оптимального развития, который характеризует группу геомов. Геосистема категории 0 на каждом таксономическом уровне наиболее соответствует ядерному таксону, является его представителем в младших таксонах. Исходя из соотношения площадей разноранговых природных подразделений [Крауклис, 1979; Виноградов, 1998] и начиная от земного типа географической среды, можно выделить 10–13 классификационных уровней, отличающихся по размеру на порядок (в 10 раз) [Ландшафтно-интерпретационное ... , 2005]. При классификации по триадной схеме на каждом уровне  $n$  появляется  $3^n$  новых таксонов, и при  $n = 13$  мелких таксонов должно быть до полутора миллионов.

Основываясь на опыте исследований ландшафтов Нижнеангарской ландшафтной провинции, в качестве примера рассмотрим ИК геосистем Причунского ландшафта денудационных возвышенностей (рис. 5, а). Таксономическая позиция проявляющегося здесь геома рассматривается в зонально-региональной структуре групп типов природной среды и связанных с ней ландшафтных зон Западно-Сибирской равнины (0), Сибирского плоскогорья (1) и Байкало-Джугджурской горно-таежной физико-географической области (2). В условиях юга Средней Сибири выделяются зоны тайги (0), подтайги (1) и степи (2). Таежная зона входит в состав аркто-бореального природно-климатического пояса планеты и представлена тремя подзонами южной (0), средней (1) и северной (2) тайги.

Причунский ландшафт наглядно проявляет провинциальные черты в зоне тайги Средней Сибири. Здесь наибольшая близость к зональной норме свойственна субгидроморфному ряду фаций, сформировавшихся на мощных покровных суглинках плакоров и склонов [Крауклис, 1979]. Поверхность изрезана глубокими и узкими долинами малых таежных рек и ручьев с пятнами мерзлоты, а также пронизана выходами трапповых пород, что придает ландшафту полугорный облик. В ландшафте сформированы географическая среда и природный режим геома пихтовых лесов на мощных подзолистых суглинистых почвах денудационных возвышенностей южной тайги. Здесь в названии-описании подчеркивается таксономическая преемственность – вариантом какой природной подзоны является данный геом. Для Причунского ландшафта нормой является коренная фация пихтового осочково-мелкотравного леса со средне- и сильноподзолистыми суглинистыми почвами на присклоновых участках приводораздельных поверхностей. На коренной ландшафтной фон класса субгидроморфных фаций (0) накладываются проявления сублитоморфных (трапповых) (1) и субкриоморфных (долинных мерзлотных) (2) фаций. Данному геому (уровень I ИК) (см. рис. 5, а) принадлежат эти три класса (II) фаций. Классы делятся по категориям серийности (динамическим состояниям) на группы фаций: коренные (0), мнимокоренные (1), серийные (2). Группы включают типы (виды) фаций: оптимальные (0), промежуточные (1) и редуцированные (2) варианты. Каждый тип фаций имеет три восстановительные стадии (БГЦ): активизации (2),

стагнации (1) и нормализации (0) [Крауклис, 1979]. В последнем случае норма (0) соответствует фации с восстановленной структурой наземного покрова после катастрофических воздействий – рубок и пожаров. Далее дифференциация идет по ярусам почвенно-растительного покрова (геогоризонтам), синузиям и т. д. Для географии важно, чтобы эти категории деления были пространственно обусловлены и взаимосвязаны. Выделение растительных ассоциаций в структуре фаций не порождает нового таксономического уровня, а требует создания отраслевой ИК на основе ИК-геосистем. При ландшафтно-типологическом картографировании отображаются контуры одноранговых геомов, а легенда строится по схеме ИК [Frolov, 2015].



*Рис. 5.* Иерархическая классификация фаций геомов равнинной темнохвойной южной тайги Средней Сибири, ее триадная и линейная кодировка (а) и круговая схема классификации геосистем (б) (пояснения в тексте). Условные обозначения: I–IV – уровни иерархии; а – категории серийности (серийные (2), мнимокоренные (1), коренные (0)); б – иерархические вертикальные связи; в – факторально-динамические горизонтальные последовательности; г – соответствие позиций в иерархической классификации и в неиерархическом центре плановой проекции

Помимо иерархического вертикального порядка, геосистемы на всех уровнях объединяются в горизонтальные линейные ряды, где каждая позиция кодируется порядковым числом, в данном случае от 0 до 26 (см. рис. 5, *a*). Геосистема с номером 0 наиболее приближена к зональной норме, 26 – наиболее изменена местными факторами. Значения 0, 1 и 2 – это цифры триадного кода, упорядочивающие логические и динамические последовательности геосистем. Числовое кодирование начинается с верхних иерархических уровней, соответствующих старшим разрядам троичного числа. Например, в геоме Причунского ландшафта коренные субгидроморфные фации оптимального проявления имеют код 000, сублитоморфные коренные промежуточного развития – 101, субкриоморфные серийные редуцированные фации – 222 (порядковый номер 26).

ИК-схема на рис. 5, *a* – это развертка боковой поверхности конуса ИК. Сам ИК-конус в плановой проекции выглядит как концентр (рис. 5, *b*), окружности которого соответствуют таксонам одного уровня (сечениям конуса по критерию рангового сходства). Концентр моделирует квантовые переходы по линии от центра (геом) к коренной фации (0). В этом случае нумерация начинается с позиции геомы, охватывает по кругу классы фаций, на следующем уровне – группы фаций и, наконец, фации от 0 до 26, что соответствует линии *NS* на рис. 2. В этом проявляется сходство ИК с ПС химических элементов, когда период ПС соответствует иерархическому уровню ИК геосистем, где категории классифицирования представлены аналогичными линейными или циклическими рядами по степени факторальной изменчивости (серийности).

### **Обсуждение результатов и выводы**

Иерархическая классификация (ИК) – это последовательное разделение множества объектов на подчиненные группы в порядке от высшего к низшему, от общего к частному, где каждое звено раскрывает и уточняет свойства объектов вышележащего уровня. Различается естественная иерархия геосистем-геохор и иерархия геомеров, приводящая к таксономической вневременной ИК. Природная иерархия проявляется в широтной и высотнопоясной дифференциации ландшафтов, что отражается в схемах классификации видов горных ландшафтов А. Г. Исаченко и природных зон А. А. Григорьева и М. И. Будыко. Хорологический подход противостоит типологическому, в основу которого положены идеи внутризональной дифференциации, представленные в работах В. Б. Сочавы и других авторов ландшафтных ИК. Оба подхода смыкаются в позиции «природная зона», соответствующей, с одной стороны, равнинным ландшафтам, а с другой – элементарному типу географической среды глобального уровня. Территориально и таксономически тип природной среды объединяет эту зональную норму и все факторально-динамические пространственные и временные вариации ареалов ее проявления на всех уровнях локального и регионального масштаба, а собственно природная зона представляет «материнское ядро» данного типа природной среды в географических циклах эволюции планеты.

Появляется возможность рассматривать хронологическую и типологическую модели иерархической организации географических знаний с общих сквозных позиций и в ландшафтных, и в социально-экономических исследованиях территорий.

В качестве базовой метамодели иерархического строения принимается конус как некоторая идеализация пространственных и таксономических пирамид объектов, данных и знаний. Для анализа конических свойств привлекаются методы начертательной (описательной) геометрии, позволяющей рассматривать конус во фронтальной и плановой проекциях. Поверхностная структура и развертка конуса с сечениями (слоениями) на разных уровнях моделирует иерархию, а плановая проекция в виде концентрических, циклических, многослойных структур (гетерархии) рассматривается как модель архетипа формирования иерархии. Такая формализация позволяет использовать аналитические методы для количественной обработки информации о геосистемах. Концентры гетерархии отражают структуру слоя касательного расслоения над многообразием географической среды. Надстройки над слоем соответствуют структурам и функциям иерархий разного вида.

Концентрическая модель имеет различные интерпретации: структура касательных слоев, проекция слоений конуса, многоуровневая иерархия, системы локальных координат и треугольников-симплексов, системы числовых окружностей и комплексных чисел, дифференциальных уравнений, волновой процесс и т.д. В каждой модели производится новое знание, полезное для специального таксономического анализа. В основе ИК лежит триадный принцип организации классификации, когда таксону верхнего уровня соответствуют три градации нижнего, которые выстраиваются в гомологический ряд по степени серийности – видоизменения нормального ненарушенного (нулевого) состояния геосистем зонального типа. При координатном подходе ИК выглядит как ранжированный набор меронов и таксонов, где категории мерона представлены квантовыми числами координатного ряда, а таксон – последовательностью таких чисел из разноуровневых рядов (числовым кодом). Каждая координата соответствует категориям одного таксономического уровня. В этом случае прослеживается прямая аналогия между ПС химических элементов и типологической классификацией геосистем, когда периоды ПС соответствуют высотным ярусам и широтным поясам (счет начинается с нивально-гляциальных геосистем) или иерархическим уровням геомеров (отсчет идет с позиции природных зон).

Систематизация типологических единиц – геомеров проводится на основе представления о факторально-динамических рядах, где под динамикой понимается формирование и снятие факторной изменчивости (серийности). По аналогии на каждом иерархическом уровне в факторальных координатных рядах выделяются три базовые категории изменчивости: коренные (0), мнимокоренные (1) и серийные (2) геомеры. ИК геома Причунского ландшафта отражает его место в планетарной и региональной системе типологии геосистем и в границах южной тайги Средней Сибири, где наибольшая близость к зональной норме свойственна субгидроморфному ряду (классу) фаций.

По триадному принципу выделяются группы фаций и отдельные типы фаций (фации) со свойственными им природными режимами, отраженными в восстановительной последовательности трех переменных состояний (типов БГЦ).

В географии накоплено достаточное количество типологической информации для построения разветвленной ИК и дальнейшего ее практического применения. Вместе с тем многозначность и многомерность трактовки концентрической модели архетипа требует специального рассмотрения каждого модельного среза для организации географических знаний и обеспечения оценки параметров функций разного типа геосистем.

*Исследование выполнено за счет средств государственного задания АААА-А21-121012190056-4.*

### Список литературы

- Васильев А. Г., Васильева И. А.* Гомологическая изменчивость морфологических структур и эпигенетическая дивергенция таксонов: Основы популяционной мерономии. М. : Тов-во науч. изд. КМК, 2009. 511 с.
- Виноградов Б. В.* Основы ландшафтной экологии. М. : ГЕОС, 1998. 418 с.
- Гомология и гомотопия географических систем. Новосибирск : Гео, 2009. 351 с.
- Григорьев А. А., Будыко М. И. О периодическом законе географической зональности // Доклады Академии наук СССР. 1956. Т. 110, № 1. С. 129–132.
- Грюнбаум А.* Философские проблемы пространства и времени. М. : Прогресс, 1969. 590 с.
- Зиновьев А. Ю.* Визуализация многомерных данных. Красноярск : Изд. КГТУ, 2000. 180 с.
- Исаченко А. Г.* Ландшафты СССР. Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1985. 320 с.
- Короткий В. А., Хмарова Л. И., Буторина И. В.* Начертательная геометрия. Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2014. 191 с.
- Крауклис А. А.* Применение организационных принципов в физической географии // Методологические вопросы географии. Иркутск, 1977. С. 37–51.
- Крауклис А. А.* Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск : Наука, 1979. 232 с.
- Ландшафтно-интерпретационное картографирование / ред. А. К. Черкашин. Новосибирск : Наука, 2005. 424 с.
- Месарович М., Мако Д., Такахара И.* Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Мир, 1973. 344 с.
- Мильков Ф. Н.* Правило триады в физической географии // Землеведение. 1984. Т. 15. С. 18–25.
- Михеев В. С.* Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири. Новосибирск : Наука, 1987. 207 с.
- Михеев В. С.* Ландшафтный синтез географических знаний. Новосибирск : Наука, 2001. 216 с.
- Петров Т. Г.* Иерархическая периодическая система химических составов объектов любой природы и ее связь с периодической системой химических элементов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. 2009. Вып. 2. С. 21–28.
- Петров Т. Г., Краснова Н. И.* R-Словарь-каталог химических составов минералов. СПб. : Наука, 2010. 180 с.
- Ретеюм А. Ю.* Земные миры. М. : Мысль, 1988. 268 с.
- Розенберг Г. С.* Эколого-гомологические ряды различных масштабов // Известия Самарского НЦ РАН. Биологические науки, 2000. Т. 2, № 2. С. 185–190.

- Сергеев В. М., Сергеев К. В.* Механизмы эволюции политической структуры общества: социальные иерархии и социальные сети // Полис. 2003. № 3. С. 6–13.
- Снытко В. А., Коновалова Т. И.* Механизмы преобразования таежных геосистем Прибайкалья // География и природные ресурсы. 2015. № 2. С. 31–38.
- Сочава В. Б.* К теории классификации геосистем с наземной жизнью // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. 1972. Вып. 34. С. 3–14.
- Сочава В. Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск : Наука, 1978. 318 с.
- Суворов Е. Г.* Опыт ландшафтного районирования Приангарья по фациальной структуре территории // География и природные ресурсы. 1987. № 4. С. 69–74.
- Хакимов Э. М.* Диалектика иерархии и неиерархии в философии и научном знании. Казань : Изд-во «Фэн» АН РТ, 2007. 288 с.
- Черкашин А. К.* Полисистемное моделирование. Новосибирск : Наука, 2005. 280 с.
- Черкашин А. К.* Естественная классификация географических систем: модели представления знаний // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 31. С. 69–87.
- Калайджиева М.* Иерархията: теория и методология. София : Изд-во на Българската академия на науките, 1985. 257 с.
- A new European landscape classification (LANMAP): A transparent, flexible and user-oriented methodology to distinguish landscapes / C. A. Mucher, J. A. Klijn, D. M. Wascher, J. H. J. Schaminée // Ecological indicators. 2010. Vol. 10, N 1. P. 87–103.
- A new landscape classification system for monitoring and assessment of pastures / S. C. Goslee, M. A. Sanderson, K. E. Spaeth, J. E. Herrick, K. Ogles // Journal of Soil and Water Conservation. 2014. Vol. 69, N 1. P. 17A–21A.
- Bailey R. H.* A hierarchical landscape classification for recreational land use planning in the finger lakes region of New York state. Cornell : Cornell university publisher, 1974. 494 p.
- Blankson E. J., Green B. H.* Use of landscape classification as an essential prerequisite to landscape evaluation // Landscape and urban planning. 1991. Vol. 21, N 3. P. 149–162.
- Borges H. B., Silla Jr. C. N., Nievola J. C.* An evaluation of global-model hierarchical classification algorithms for hierarchical classification problems with single path of labels // Computers & Mathematics with Applications, 2013. Vol. 66. N 10. P. 1991–2002. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2013.06.027>
- Brabyn L.* Classifying landscape character // Landscape Research. 2009. Vol. 34, N 3. P. 299–321.
- Bronfenbrenner U., Morris P. A.* The bioecological model of human development // W. Damon & R. M. Lerner (Eds.), Handbook of child psychology, Vol. 1. Theoretical models of child development. 6<sup>th</sup> ed. N. Y.: Wiley, 2006. p. 793–828.
- Cherkashin A. K.* Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society // Mathematical modelling of natural phenomena, 2009. Vol. 4, N 5. P. 4–20.
- Ecosystem classification for environmental management / ed. F. Klijn. Leiden : Springer-science +Business media, B.V., 1994. 293 p. (Ecology & Environment ; vol. 2).
- Frolov A.A.* Geoinformational mapping of landscape variability (Exemplified by Southern Cisbaikalia) // Geography and Natural Resources. 2015. Vol. 36, N 1. P. 99–107.
- Gordon A. D.* A Review of hierarchical classification // Journal of the royal statistical society. Series A (General). 1987. Vol. 150, N. 2. P. 119–137.
- Gordon A. D.* Classification. Chapman and Hall/CRC, 2019. 272 p.
- Hierarchical and non-hierarchical classification methods // A Dictionary of plant sciences / Allaby M. (ed.) Oxford University press, 2006. 7349 p.
- Hierarchy in natural and social sciences / ed. Pumain D. Springer, 2006. 256 p. (Methodos series ; book 3).
- Kassambara A.* Practical guide to cluster analysis in R: Unsupervised machine learning. Statistical tools for high-throughput data analysis STHDA, 2017. URL: <http://www.sthda.com/>
- Klijn F., Udo de Haes H.A.* A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification Landscape Ecology, 1994. Vol. 9, N 2. P. 89–104.



*Lindenmayer D. B., Hobbs R. J.* Synthesis: Landscape classification // Managing and designing landscapes for conservation: Moving from perspectives to principles. Oxford : Wiley-Blackwell publishing, 2007. P. 49–51.

Mendeleev to oganesson: a multidisciplinary perspective on the Periodic table / eds. Scerri E., Restrepo G. New York : Oxford University Press, 2018. 314 p.

*Minto B.* The Minto pyramid principle: Logic in writing, thinking and problem solving. London : Prentice Hall / Financial Times, 2009. 272 p.

*Mirkin B.* Mathematical classification and clustering. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996. 580 p.

*Parrochia D.* Mathematical theory of classification // Encyclopedia of knowledge organization / eds. Hjørland B., Gnoli C. 2020. URL: [https://www.isko.org/cyclo/mathematical\\_theory\\_of\\_classification#8](https://www.isko.org/cyclo/mathematical_theory_of_classification#8).

*Parrochia D., Neuville P.* Towards a general theory of classifications. Basel, Heidelberg. New York ; Dordrecht ; London : Springer, 2013. 304 p.

*Restrepo G. Pachón L. A.* Mathematical aspects of the periodic law // Foundations of Chemistry, 2007. V. 9. P. 189–214.

*Schröder W., Pesch R., Schmidt G.* Statistical classification of terrestrial and marine ecosystems for environmental planning // Landscape online, 2007. P. 1-22.

*Shneiderman B.* Tree visualization with tree-maps: A 2-D space-filling approach. ACM Transactions on graphics, 1992. Vol. 11, N 1. P. 92–99.

Siberian landscape classification and a digitized map of Siberian landscapes / V. Rojkov, D. Efremov, S. Nilsson, V. Sedych, A. Shvidenko, V. Sokolov, V. Wagner // IIASA working papers. N WP 96-111. Laxenburg : International Institute for Applied Systems Analysis, 1996. 61 p.

*Silla C. N., Freitas A. A.* A survey of hierarchical classification across different application domains // Data mining and knowledge discovery. 2011. Vol. 22, N 1–2. P. 31–72.

Suitable landscape classification systems for quantifying spatiotemporal development of riverine ecosystem services / K. R. Koopman, D. C. M. Augustijn, A. M. Breure, H. J. R. Lenders, R. S. E. W. Leuven // Freshwater Science. 2018. Vol. 37, N 1. P. 190–204.

*Wagner V.* Analysis of a russian landscape map and landscape classification for use in computer-aided forestry research // IIASA Interim Report. IR-97-054. Laxenburg: International Institute for applied systems analysis, 1997. 53 p. Available at: <http://pure.iiasa.ac.at/5240/>

*Yang J., Zhang S.* Ecological landscape classification and dynamic change mapping in the Taoer River basin, Northeast China // Proc. SPIE 7491, PIANGENG 2009: Remote Sensing and Geoscience for Agricultural Engineering, 2009. URL: <https://doi.org/10.1117/12.836691>

## Hierarchical Classification of Geographical Systems

A. K. Cherkashin

*V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

**Abstract.** A hierarchical system is the result of dividing a set of objects into subordinate groups in order from highest to lowest, where each lower level reveals and clarifies the properties of objects at a higher level. There is a difference between the natural hierarchy of geosystems-geochors and the hierarchy of geomers, which leads to taxonomic classification. Theoretical basis for creating a hierarchical classification of geosystems are developed using a conceptual model of geographical cycles of accumulation and removal of factor load on territorial objects of various scales. The cone of chorological and typological connections is considered as the basic metamodel of hierarchical structure. For its research, we use descriptive geometry tools to represent the cone in the vertical and horizontal (plan) projections. The surface and unfolding structures of the cone with sections at different levels reflect the hierarchy. The

planned projection in the form of concentric structures is considered as model of the archetype of hierarchy formation. The horological and typological classifications converge in the position “natural zone” as the “parent core” of the type of natural environment, which represents the zonal norm. The concentric model has various interpretations, in particular, it is described as a system of local coordinates, where each coordinate corresponds to the categories of seriality of geosystems, i.e. the degree of their factorial-dynamic variability relatively to zonal geosystems. In the coordinate approach, the classification looks like a ranked set of merons and taxa, where the meron categories are represented by quantum numbers of the coordinate series, and the taxon is a sequence of such numbers of different series (numeric code). The formation of hierarchical classification is based on the triad principle, when the taxon of the upper level is divided into three lower level gradations, which are arranged in a homological series according to the degree of seriality. There is an analogy between the hierarchical structure of the periodic system of chemical elements and the typological classification of geosystems, when the periods of the system of elements correspond to the high-altitude layers and latitudinal zones of geochor placement or hierarchical levels of geomer classification. An unfolding and plan projection of the classification cone of facies for the Prichunsky landscape of the southern taiga of Central Siberia in three basic categories of variability of different levels geomers are presented.

**Keywords:** hierarchical classification, periodic system, typological stratification and foliation, mathematical models of archetypes, concentric knowledge model, homological series.

**For citation:** Cherkashin A.K. Hierarchical classification of geographical systems. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2021, vol. 35, pp. 125-153. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2021.35.125> (in Russian)

## References

- Vasil'ev A.G., Vasil'eva I.A. *Gomologicheskaya izmenchivost' morfologicheskikh struktur i epigeneticheskaya divergenciya taksonov: Osnovy populyacionnoj meronomii* [Homological variability of morphological structures and epigenetic divergence of taxa: Fundamentals of population meronomy]. Moscow, Association of scientific publications KMK, 2009, 511 p. (in Russian)
- Vinogradov B.V. *Osnovy landshaftnoj ekologii* [Fundamentals of landscape ecology]. Moscow, GEOS Publ., 1998, 418 p. (in Russian)
- Gomologiya i gomotopiya geograficheskikh sistem* [Homology and homotopy of geographical systems]. Novosibirsk, Geo Publ., 2009, 351 p. (in Russian)
- Grigor'ev A.A., Budyko M.I. O periodicheskom zakone geograficheskoy zonalnosti [On the periodic law of geographical zoning]. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1956, vol. 110, no. 1, pp. 129-132. (in Russian)
- Gryunbaum A. *Filosofskie problemy prostranstva i vremeni* [Philosophical problems of space and time]. Moscow, Progress Publ., 1966, 590 p. (in Russian)
- Zinov'ev A. YU. *Vizualizaciya mnogomernyh dannyh* [Visualization of multidimensional data]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 2000, 180 p. (in Russian)
- Isachenko A.G. *Landshafty SSSR*. [Landscapes of the USSR] Leningrad, Leningrad Univ. Publ., 1985, 320 p. (in Russian)
- Korotkij V. A., Hmarova L.I., Butorina I.V. *Nachertatel'naya geometriya* [Descriptive geometry]. Chelyabinsk, Publ. center YUUrGU, 2014, 191 p. (in Russian)
- Krauklis A.A. Primenenie organizacionnyh principov v fizicheskoy geografii [Application of organizational principles in physical geography]. *Metodologicheskie voprosy geografii* [Methodological issues of geography]. Irkutsk, 1977, pp. 37-51. (in Russian)
- Krauklis A.A. *Problemy eksperimentalnogo landshaftovedeniya* [Problems of experimental landscape studies]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1979, 233 p. (in Russian)
- Mesarovich M., Mako D., Takahara I. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnyh sistem* [Theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow, Mir Publ., 1973, 344 p. (in Russian)

- Milkov F.N. *Pravilo triady v fizicheskoj geografii* [The triad rule in physical geography]. *Earth sciences*, 1984, vol. 15, pp. 18-25. (in Russian)
- Miheev V.S. *Landshaftno-geograficheskoe obespechenie kompleksnyh problem Sibiri* [Landscape and geographical support of complex problems of Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987, 207 p. (in Russian)
- Miheev V.S. *Landshaftnyj sintez geograficheskikh znaniy* [Landscape synthesis of geographical knowledge]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2001. 216 p. (in Russian)
- Petrov T.G. Ierarhicheskaya periodicheskaya sistema himicheskikh sostavov ob"ektov lyuboj prirody i ee svyaz' s periodicheskoy sistemoy himicheskikh elementov [Hierarchical periodic system of chemical compositions of objects of any nature and its connection with the periodic system of chemical elements]. *Bulletin of the St. Petersburg Univ., Ser. 7*, 2009, vol. 2, pp. 21-28. (in Russian)
- Petrov T.G., Krasnova N.I. *R-Slovar-katalog himicheskikh sostavov mineralov* [R-Dictionary-catalog of chemical compositions of minerals]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2010, 180 p. (in Russian)
- Reteyum A.YU. *Zemnye miry* [Earth worlds]. Moscow, Mysl Publ., 1988, 268 p. (in Russian)
- Rozenberg G.S. *Ekologo-gomologicheskie ryady razlichnyh masshtabov* [Ecological-homological series of different scales]. *Proceedings of the Samara SC RAN. Biol. Sciences*, 2000, vol. 2, no. 2, pp.185-190. (in Russian)
- Sergeev V.M., Sergeev K.V. *Mekhanizmy evolyucii politicheskoy struktury obshchestva: social'nye ierarhii i social'nye seti* [Mechanisms of evolution of the political structure of society: social hierarchies and social networks]. *Polis*, 2003, no. 3, pp. 6-13. (in Russian)
- Snytko V.A., Konovalova T.I. *Mekhanizmy preobrazovaniya taezhnyh geosistem Pribajkaliya* [Mechanisms of transformation of taiga geosystems of the Baikal region]. *Geography and natural resources*, 2015, no. 2, pp. 31-38. (in Russian)
- Sochava V.B. *K teorii klassifikacii geosistem s nazemnoj zhizn'yu* [On the theory of classification of geosystems with terrestrial life]. *Reports of the Institute of geography of Siberia and the Far East*. vol. 34, 1972, pp. 3-14. (in Russian)
- Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemah* [Introduction to the doctrine of geosystems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, 318 p. (in Russian)
- Suvorov E.G. *Opyt landshaftnogo rajonirovaniya Priangar'ya po facialnoj strukture territorii* [Experience of landscape zoning of the Angara region according to the facies structure of the territory]. *Geography and natural resources*, 1987, no. 4, pp. 69-74. (in Russian)
- Hakimov E.M. *Dialektika ierarhii i neirarhii v filosofii i nauchnom znanii* [Dialectics of hierarchy and non-hierarchy in philosophy and scientific knowledge]. Kazan, Fen AN RT Publ., 2007, 288 p. (in Russian)
- Cherkashin A.K. *Polisistemnoe modelirovanie* [Polysystem modeling]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 280 p. (in Russian)
- Cherkashin A.K. (ed.) *Landshaftno-interpretacionnoe kartografirovanie* [Landscape and interpretive mapping]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 424 p. (in Russian)
- Cherkashin A.K. *Estestvennaya klassifikaciya geograficheskikh sistem: modeli predstavleniya znaniy* [Natural classification of geographical systems: knowledge representation models]. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Science*, 2020, vol. 31, pp. 69–87. (in Russian)
- Kalajdzhieva M. *Jerarhiyata: teoriya i metodologiya* [Hierarchy: theory and methodology]. Sofia, Bulgarian Academy of Sciences publ. house, 1985, 257 p. (in Bulgarian)
- Allaby M. (ed.) *Hierarchical and non-hierarchical classification methods // A Dictionary of plant sciences*, Oxford University press, 2006. 7349 p.
- Bailey R.H. *A hierarchical landscape classification for recreational land use planning in the finger lakes region of New York state*. Cornell, Cornell university publ., 1974, 494 p.

- Blankson E.J., Green B.H. Use of landscape classification as an essential prerequisite to landscape evaluation. *Landscape and urban planning*, 1991, vol. 21, no. 3, pp. 149-162.
- Borges H.B., Silla Jr. C.N., Nievola J.C. An evaluation of global-model hierarchical classification algorithms for hierarchical classification problems with single path of labels. *Computers & Mathematics with Applications*, 2013, vol. 66, no. 10, pp. 1991-2002. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2013.06.027>
- Brabyn L. Classifying landscape character. *Landscape Research*, 2009, vol. 34, no. 3, pp. 299-321.
- Bronfenbrenner U., Morris P.A. The bioecological model of human development. *Damon W. & Lerner R.M. (eds.). Handbook of child psychology, vol. 1. Theoretical models of child development*. NY, Wiley Publ., 2006, pp. 793-828.
- Cherkashin A.K. Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society. *Mathematical modelling of natural phenomena*, 2009, vol. 4, no. 5, pp. 4-20.
- Frolov A.A. Geoinformational mapping of landscape variability (example by Southern Cisbaikalia). *Geography and natural resources*, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 99-107.
- Gordon A.D. A Review of hierarchical classification. *Journal of the royal statistical society. Series A (General)*, 1987, vol. 150, no. 2, pp. 119-137.
- Gordon A.D. *Classification*. Chapman and Hall CRC, 2019, 272 p.
- Goslee S.C., Sanderson M.A., Spaeth K.E., Herrick J.E., Ogles K. A new landscape classification system for monitoring and assessment of pastures. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, vol. 69, no. 1, pp. 17A-21A.
- Kassambara A. *Practical guide to cluster analysis in R: Unsupervised machine learning. Statistical tools for high-throughput data analysis STHDA*, 2017, Available at: <http://www.sthda.com/>
- Klijn F. (ed.) *Ecosystem classification for environmental management*. Ecology & Environment, vol. 2, Leiden, Springer-science+Business media, B.V., 1994, 293 p.
- Klijn F., Udo de Haes H.A. A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. *Landscape Ecology*, 1994, vol. 9, no. 2, pp. 89-104.
- Koopman K.R., Augustijn D.C.M., Breure A.M., Lenders, H.J.R. Leuven R.S.E.W. Suitable landscape classification systems for quantifying spatiotemporal development of riverine ecosystem services. *Freshwater Science*, 2018, vol. 37, no. 1, pp. 190-204.
- Lindenmayer D.B., Hobbs R.J. Synthesis: Landscape classification. *Managing and designing landscapes for conservation: Moving from perspectives to principles*. Oxford, Wiley-Blackwell publ., 2007, pp. 49-51.
- Minto B. *The Minto pyramid principle: logic in writing, thinking and problem solving*. London, Prentice Hall/Financial Times, 2009, 272 p.
- Mirkin B. *Mathematical classification and clustering*. Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1996, 580 p.
- Mucher C.A., Klijn J.A., Wascher D.M., Schaminée J.H.J. A new European landscape classification (LANMAP): A transparent, flexible and user-oriented methodology to distinguish landscapes. *Ecological indicators*, 2010, vol. 10, no. 1, pp. 87-103.
- Parrochia D. Mathematical theory of classification. *Encyclopedia of knowledge organization. Hjørland B., Gnoli C. (eds.)*, 2020. Available at: [https://www.isko.org/cyclo/mathematical\\_theory\\_of\\_classification#8](https://www.isko.org/cyclo/mathematical_theory_of_classification#8).
- Parrochia D., Neuville P. *Towards a general theory of classifications*. Basel, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, Springer, 2013, 304 p.
- Pumain D. (ed.). *Hierarchy in natural and social sciences*. Springer, Methodos series, Book 3, 2006, 256 p.
- Restrepo G. Pachón L.A. Mathematical aspects of the periodic law. *Foundations of Chemistry*, 2007, vol. 9, pp. 189-214.

Rojkov V., Efremov D., Nilsson S., Sedych V., Shvidenko A., Sokolov V., Wagner V. Siberian landscape classification and a digitized map of Siberian landscapes. *IIASA working papers. N WP 96-111*. Laxenburg, International Institute for Applied Systems Analysis, 1996, 61 p.

Scerri E., Restrepo G. (eds.) *Mendeleev to oganesson: a multidisciplinary perspective on the Periodic table*. New York, Oxford University Press, 2018, 314 p.

Schröder W., Pesch R., Schmidt G. Statistical classification of terrestrial and marine ecosystems for environmental planning. *Landscape online*, 2007, pp. 1-22.

Shneiderman B. Tree visualization with tree-maps: A 2-D space-filling approach. *ACM Transactions on graphics*, 1992, vol.11, no. 1, pp. 92-99.

Silla C.N., Freitas A.A. A survey of hierarchical classification across different application domains. *Data mining and knowledge discovery*, 2011, vol. 22, no. 1–2, pp. 31–72.

Wagner V. Analysis of a russian landscape map and landscape classification for use in computer-aided forestry research. *IIASA Interim Report. R-97-054*. Laxenburg, International Institute for applied systems analysis, 1997, 53 p. Available at: <http://pure.iiasa.ac.at/5240/>

Yang J., Zhang S. Ecological landscape classification and dynamic change mapping in the Taoer River basin, Northeast China. *Proc. SPIE 7491, PIAGENG 2009: Remote Sensing and Geoscience for Agricultural Engineering*, 2009, Available at: <https://doi.org/10.1117/12.836691>

**Черкашин Александр Константинович**  
доктор географических наук, профессор,  
заведующий, лаборатория теоретической  
географии

Институт географии им. В. Б. Сочавы  
СО РАН

Россия, 664033, г. Иркутск,

ул. Улан-Баторская 1

e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Cherkashin Alexander Konstantinovich**  
Doctor of Sciences (Geography), Professor,  
Head of the Laboratory of Theoretical  
Geography

V. B. Sochavy Institute of Geography SB RAS  
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,

Russian Federation

e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)