

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ

Научная статья

УДК 911.52

doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-6-22

**КОМПЛЕКСНАЯ ГЕОГРАФИЯ КАК НАПРАВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ****Александр Константинович Черкашин¹, Елена Александровна Распутина²**^{1,2}Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук, г.Иркутск, Россия¹akcherk@irknok.net, <http://orcid.org/0000-0002-7596-7780>, Scopus Author ID: 7003391794, Author ID: 58425²elenaistoma@gmail.com[✉], <http://orcid.org/0000-0001-7613-7052>, Scopus Author ID: 8610552700, Author ID: 120886

Аннотация. Формулируются основные понятия и аксиомы концепции комплексной географии, определяются ее предмет, методы и модели, прослеживаются отличия этого подхода от других направлений развития теории географической науки, строятся количественные модели геокомплексов по материалам дистанционных исследований. Под комплексами понимаются метризованные, индуктивные, коммутативные, транзитивные, линейно упорядоченные, дискретно-непрерывные, ограниченные, изменяющиеся гомотопические системы информационного обмена, состоящие из функционально связанных разнородных элементов. Это отличает комплексный подход от геосистемно-динамического и других моделей реальности. Рассматриваются понятия теории сложных систем-комплексов: расслоение, композиции, комбинации, конфигурации, конгруэнции, касательные преобразования, аналогия, гомология и гомотопия, категории и топосы. При моделировании применяются определитель Якоби как мера связности, ранговые распределения для ординалистского оценивания. Модели иллюстрируются примерами традиционной географической науки (сравнительно-географический метод, факторально-динамические ряды, закон географической зональности и др.). На основе разработанных моделей проведен сравнительный анализ ландшафтов Прибайкалья с использованием дистанционных данных. В качестве независимых переменных (влияющих факторов) рассматривались высота местности над у.м. по данным цифровой модели рельефа и потенциальный суммарный приход солнечной радиации. В качестве зависимых переменных использовались средняя продолжительность залегания устойчивого снежного покрова и температура земной поверхности по данным MODIS. Выявлена конгруэнция разных участков территории, которая обосновывает комплексность климатических характеристик Прибайкалья по выбранным показателям.

Ключевые слова: сложные системы, географический комплекс, подобие, конгруэнция, связность, гомология, гомотопия

Для цитирования: Черкашин А.К., Распутина Е.А. Комплексная география как направление теоретических исследований и моделирования // Географический вестник = Geographical bulletin. 2022. № 1(60). С. 6–22. doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-6-22.



THEORETICAL GEOGRAPHY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-6-22

**COMPLEX GEOGRAPHY AS A DIRECTION OF
THEORETICAL RESEARCH AND MODELING****Aleksander K. Cherkashin¹, Elena A. Rasputina²**^{1,2} V.B. Sochava Institute of Geography Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia¹ akcherk@irkok.net, <http://orcid.org/0000-0002-7596-7780>, Scopus Author ID: 7003391794, Author ID: 58425² elenaistoma@gmail.com[✉], <http://orcid.org/0000-0001-7613-7052>, Scopus Author ID: 8610552700, Author ID: 120886

Abstract. The paper formulates basic terms and axioms of the concept of complex geography, defines its subject, methods and models, traces the differences between this approach and other directions in the development of the theory of geographical science, presents quantitative models of geocomplexes constructed based on remote sensing data. By complexes we mean metrized, inductive, commutative, transitive, linearly ordered, discrete-continuous, limited, and changing homotopy systems of information exchange that consist of functionally related heterogeneous elements. This distinguishes the complex approach from the geosystem-dynamic one and from other models of reality. The paper considers the terms of the theory of complex systems: bundle, compositions, combinations, configurations, congruences, tangent transformations, analogy, homology and homotopy, categories and toposes. In modeling, we use the Jacobi determinant as a measure of connectivity and rank distributions for ordinalistic evaluation. The models are illustrated by examples from traditional geographical science (the comparative-geographical method, factor-dynamic series, the law of geographical zoning, etc.). Based on the developed models, we carried out a comparative analysis of the landscapes of the Baikal region using remote sensing data. The elevation and the potential insolation according to the digital elevation model were considered as independent variables (influencing factors). As the dependent variables, the average duration of occurrence of stable snow cover and the earth's surface temperature according to MODIS data were used. The research revealed a congruence of different parts of the territory, which justifies the complexity of the climatic characteristics of the Baikal region according to the selected indicators.

Keywords: complex systems, geographical complex, similarity, congruence, connectedness, homology, homotopy

For citation: Cherkashin, A.K. and Rasputina, E.A. (2022). Complex geography as a direction of theoretical research and modeling. *Geographical Bulletin*. No. 1(60). Pp. 6–22. doi: 10.17072/2079-7877-2022-1-6-22.

Введение

Появление теоретических работ в географии связано с началом массового применения «научных методов», с так называемой «количественной революцией» 50–60 гг. XX в.: Д. Харвей, В. Бунге и др. [32]. В «Теоретической географии» В. Бунге [5] рассматривает географию как номотетическую науку, законы которой в равной мере справедливы в любой точке пространства и времени, что обеспечивает постоянную и повсеместную их применимость. Он подчеркивал важность использования математических методов, особенно геометрии, в географических исследованиях. Вместе с тем в его работах отсутствовали формулы, он ограничивался графическими иллюстрациями своих идей.

Особенность географических исследований с привлечением математики – их логичность, многоаспектность, всесторонность охвата, системность и комплексность отображения объекта изучения. Это свойственно всей науке, но географии в особенности, и выражается в принципе плюрализма познания – философской позиции, признающей существование множества различных равноправных, независимых и несводимых друг

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

к другу форм знания и методологий познания или форм бытия. Обычно это качество связывается с уникальностью личного опыта, субъективной, исторической и социальной обусловленностью знания, но в формирующейся полисистемной методологии [26] за ним закрепляются объективные начала, свойства, характерные для реального мира.

В соответствии с этой позицией географические явления невозможно «измерить» какой-нибудь одной теорией и нельзя создать системную теорию только географического содержания. Необходимы сквозные теории, каждая из которых на специальном языке объясняет свой моносистемный срез объектов, наблюдает его со своей стороны, а в совокупности формируется его полисистемный образ. Методология полисистемного анализа и синтеза [23] предлагает алгоритмы создания разнообразных математических моделей объектов, основываясь на существовании множества их системных интерпретаций, для каждой из которых формируются свое представление о системах и своя аксиоматическая теория. Необходимо выделить особенности каждой из таких теорий, их понятийный и аксиоматический базис, продемонстрировать примеры их применения в практике географических исследований, как это сделано на примере моделей функциональных геосистем [25].

В этой статье рассматривается концепция комплексной географии, которая справедливо считается основой, ядром географической науки, что подразумевает создание теоретической модели географических комплексов (геокомплексов) – главной в ряду разнообразных моделей описания территориальных объектов. Геокомплексы (ПТК и ТПК) изучаются в рамках описания географических объектов как сложных систем [7; 24; 25; 29].

Современное состояние проблемы

Развитие комплексного подхода в географии связано с именами Н.А. Солнцева, Д.Л. Арманда, Э. Неефа, В.С. Преображенского и др. [4; 16; 18]. Географический комплекс обычно рассматривается как «пространственно ограниченный набор компонентов, объединенных относительно тесным взаимодействием» [4, с. 7]. Каждый комплекс представляет собой систему более простых комплексов, т.е. все они организованы определенным образом и развиваются сопряженно [18]. Прослеживаются закономерное упорядоченное сочетание частей комплекса и их системная связь. Вместе с тем такого рода закономерности еще не выражены строго на формальном математическом языке, что обычно относят к молодости географической науки как комплексной дисциплины [18] или связывают с высокой сложностью географических процессов и явлений [4; 16, с. 23].

Как следствие отсутствия формализованной теории географических комплексов произошла переориентация исследователей на изучение геосистемных моделей и методов [19], призванных интегрировать отраслевое знание на основе структурно-динамического подхода. Это выразилось в том, что в словарях и справочниках не различают понятия «геосистема» и «геокомплекс» [15; 27], хотя с ними связаны совершенно разные направления исследований. В последних статьях и монографии В.Б. Сочава [19] практически не употребляет термин «комплекс». Учение о геосистемах рассматривает географические объекты как открытые многокомпонентные динамические системы и изучает компоненты геосистем и связанные с ними процессы в их единстве [19]. Геосистемные процессы представляются как множество элементов, переходящих из одного состояния в другое под воздействием внешних и внутренних факторов [23]. Геокомплексы изучаются как структуры подобия их разнокачественных частей, характеристик и изменений типа единого физико-географического процесса [9], указывающих на взаимообусловленность и внутреннее единство географической оболочки. В геосистемах связи компонентов осуществляются через потоки вещества и энергии, а в геокомплексах – через функциональные (информационные) отношения [1; 2; 11]. В информационно-логическом анализе такие отношения между компонентами в ландшафтах

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

называются каналами связи [17], определяющими функциональную сопряженность компонентов. Большинство географов понимают, что комплекс – структура, призванная синтезировать все разнокачественное, а не только отраслевое, географическое знание в целостное представление о территории. Получается, что объект и предмет комплексных исследований – это одно и то же по объему понятий.

В зарубежных эколого-географических исследованиях также используются представления о сложных системах – комплексах, под которыми понимаются системы с большим количеством разнообразных компонентов, нелинейными взаимодействиями, масштабной множественностью [33], пространственной неоднородностью, непредсказуемой динамикой и самоорганизацией [31; 37]. Отечественные и зарубежные ученые считают, что моделирование предназначено для познания именно сложных явлений, что приводит к изучению геокомплексов с позиций теории сложных систем.

Модели и методы исследования

При моделировании явлений порядка и связности применяются различные формализмы: евклидовое расстояние, корреляционный и регрессионный анализы, теоретико-информационная оценка межкомпонентной сопряженности, теоретико-множественные меры сходства, кластерные и другие модели [11]. Меры связности этого списка недостаточно теоретически обоснованы, поэтому его следует дополнить другими математически оправданными показателями.

Выделены две теории сложных систем: общая и специальная [7; 23; 29]. Первая постулирует и рассматривает базовые принципы существования и изменения комплексов, вторая – предлагает методы количественного анализа сложных систем. Общая теория возникла как результат интерпретации общесистемных понятий и законов [4] в терминах изучения сложных систем, принятых в математике и других научных дисциплинах. Получившиеся в высокой степени формализованные понятия и соотношения переводятся на язык учения о географических комплексах, разработанного в трудах классиков ландшафтоведения.

Основополагающей в теории комплексов является процедура расслоения $\pi: X \rightarrow B$ – разбиения π целого X (объекта, множества, пространства) на непересекающиеся разнородные части X_i : подмножества, слои, срезы, позиции, компоненты, выделы и т.д. [21; 22]. Например, при расслоении территории X на базе B_1 типологических ландшафтных единиц – фаций или на базе B_2 хронологических единиц – урочищ получается разная сетка выделов различного содержания. В данном случае база – это аналог картографической легенды. Так формируется разнообразие (полиструктурность) разнокачественных слоев всех объектов, составляющих географическую оболочку планеты. Подразумевается, что слои этого огромного множества могут разными способами комбинироваться, образуя еще более мощное множество композиций (множество подмножеств).

В процедурах географического расслоения сначала детально обследуется территория X с описанием ключевых участков (типовых слоев), и на снимках выделяются их участки-аналоги X_i . В результате формируется схема типологии элементарных выделов – биогеоценозов (БГЦ), рассматриваемая как элементная база B_0 расслоения X . БГЦ соответствуют, с одной стороны, простейшим пространственным выделам ландшафта и фаций, а с другой, – переменным состояниям фаций, отражая временные стадии их динамики и эволюции. Контурные выделов БГЦ образуют элементарные ячейки географического пространства-времени, т.е. формируют топологический базис такого пространства: все географические объекты являются различными объединениями разных БГЦ. Объединения элементарных выделов разного вида, следуя Э. Неефу [16], называются полиморфическими композициями Y_i (геомеры, геохоры, временные и пространственные ряды).

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

Элементы композиций X_i и сами композиции Y_j упорядочены в пространстве и времени, т.е. образуют ряды элементов b с начальной α и конечной β позициями, например, катенарные ряды фаций на склонах, широтные ряды природных зон или размещение населенных пунктов относительно административного центра в границах области. Каждый такой ряд $[\alpha, \beta]$ формально соответствует части универсального индексного пространства $I = [0, 1]$, кодирующего географические процессы и явления значением $I_j = Y_j(I)$, $I_j = (b - \alpha) / (\beta - \alpha)$. Такой индекс задает место (позицию) композиции в структуре порядка $Y_j = Y(I_j)$, когда изменение значения I_j переводит сложный объект в объект иного рода $Y_j \rightarrow Y_k$, например, при перемещении вдоль трансекта, или в факторном пространстве географической среды, или в структуре классификации геокомплексов. Показатель I_j , однозначно соответствующий явлению Y_j , называется гомотопическим индексом (I-индексом). Такая индексация подчеркивает индивидуальный характер любого геокомплекса.

Комбинации и их части (слои) функционально связаны, т.е. являются не просто набором (множеством) элементов, а их системными комплексами, которые, следуя Д.Л. Арманду [3], называются конфигурациями Z_k , также кодируемыми в $I = [0, 1]$. Перевод композиций в конфигурации выражает форму сравнения (подобия) композиций безотносительно к их пространственно-временной определенности. Это позволяет включить в универсальное множество все формы элементов X_i , комбинаций Y_j и конфигураций Z_k , что были, есть и будут. Общая теория географических комплексов не содержит понятия пространства и времени, что подчеркивает специфику географического знания как учения о комплексах, а их порядок связывается только с их положением на множестве индексов $I = [0, 1]$.

Перечисленные соотношения иллюстрируются геометрической моделью в виде пучка (системы) линий, что применял Д.Л. Арманд [2] для представления географических комплексов (рис. 1). Точки (позиции) линии образуют гомологический ряд сходства, а равноудаленные от центра точки разных линий – ряды аналогов, т.е. аналогия обеспечивает сравнение различного, а гомология – сопоставление сходных явлений. Действуя по аналогии, все точки разных линий пучка могут быть сопоставлены точкам одной линии, которую можно принять за эталон сравнения или считать типовым слоем расслоения, к которому через функциональные отображения все сводится или выводится из него.

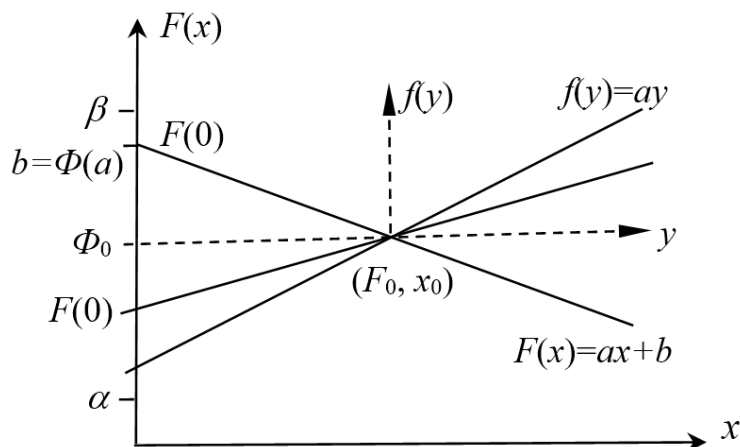


Рис. 1. Схема формирования пучка конгруэнции линейных зависимостей $F(x)=ax+b$ и $f(y)=ay$ в исходных x и смещенных локальных $y=x-x_0$ координатах (пояснения в тексте)

Fig. 1. The formation of a congruence bundle of linear dependences $F(x)=ax+b$ and $f(y)=ay$ in the original x and shifted local $y=x-x_0$ coordinates (explanations in the text)

Пучок линий с центром (x_0, F_0) на плоскости X описывается уравнением $F(x)=ax+b$ со связью коэффициентов $b = F_0 - ax_0$, $F_0 = F(x_0)$, откуда $f(y) = F(x) - F_0 = a(x-x_0)=ay$. Здесь $y=x-x_0$

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

– смещенное значение аргумента в локальной системе координат с центром (x_0, F_0) . Точки каждой линии $f(y) = ay$ в пучке за исключением центра – это элементы отдельного слоя X_i расслоения X , которые кодируются направлением линии a , значит и $b=F(0)$ – точкой пересечения линии с осью ординат (см. рис. 1). Через точку $(0, F(0))$ и центр (x_0, F_0) можно провести только одну линию из этого пучка (конгруэнции), значит $b=F(0)=f(-x_0)$ в интервале $[\alpha, \beta]$ может рассматриваться как I-индекс слоя, а интервал – как база расслоения плоскости X на линии. В такой системе координаты центра являются инвариантными характеристиками X , а индексы и точки линий – ее вариантами. В понятиях проективной геометрии точка центра отображается на индексную линию в отрезке $[\alpha, \beta]$.

Группы слоев X_i объединяются в пучки линий – композиции Y_j , которые проявляются в виде конфигураций Z_k в силу связности линий пучка за счет их поворота вокруг центра $f_1(y)=c_1f(y)=c_1ay=a_1y$, где $c_1=df_1/df$ – оператор преобразования. При этом меняется величина индекса $b_1=-c_1ax_0+F_0$. Наличие связи сравнения (подобия) $f_1(y)=c_1f(y)$ формирует пучок как комплекс. Наглядный пример пучка – факторально-динамические ряды фаций разных ландшафтов, в которых фации разных рядов сравниваются по степени серийности [12]. Центром (инвариантом) такого пучка являются коренные фации ландшафта, проявляющие на местности особенности зонального фона (типа географической среды). По этой причине инвариантные координаты центра нужно интерпретировать как характеристики условий среды, объединяющие все варианты местной изменчивости географических систем в эписистему (эпифацию, эпигеом).

Общее выражение перечисленных зависимостей возникает, если в качестве x рассматривать набор (вектор) географических характеристик объекта $x=\{x_i\}$ ($i = 1,2,3...n$) и соответственно $x_0=\{x_{0i}\}$ – набор характеристик его среды, $y=x-x_0=\{y_i\}$ – набор характеристик объекта в показателях отклонения от характеристик среды – средовой нормы существования разных объектов и их видоизменений.

В многомерных пространствах $x=\{x_i\}$ гладкая функция $F(x)$ локально определяется касательным преобразованием Лежандра $x \rightarrow a, F(x) \rightarrow \Phi(a)$:

$$F(x) = a \cdot x + \Phi(a), \quad a \cdot x = \sum_i a_i x_i, \quad a_i = \frac{\partial F(x)}{\partial x_i}, \quad x_i = -\frac{\partial \Phi(a)}{\partial a_i}, \quad (1)$$

где $a \cdot x$ – скалярное произведение двух векторов $x=\{x_i\}$ и $a=\{a_i\}$; $\Phi(a)$ – функция от a_i , результат преобразования. Касательные гиперплоскости $F(x)$ собираются в пучок в точке касания $x = x_0$ при условии

$$\Phi(a) = -a \cdot x_0 + \Phi_0 = -\sum_i a_i x_{0i} + \Phi_0, \quad x_{0i} = -\frac{\partial \Phi(a)}{\partial a_i}, \quad (2)$$

когда $F(x) = a \cdot (x - x_0) + \Phi_0 = a \cdot y + \Phi_0, f(y) = F(x) - F(x_0) = a \cdot y, F(x_0) = F_0 = \Phi_0, \quad (3)$

где $f(y) = a \cdot y$ – функция $F(x)$, заданная в локальных координатах $y=\{y_i\}$ относительно средовой позиции (F_0, x_0) . В экономике [26] $F(x)$ соответствует доходу, $\Phi(a)$ – прибыли, $f(y) = a \cdot y$ – издержкам производства, себестоимости ($a=\{a_i\}$, $x=\{x_i\}$ – цене и количеству ресурсов), $F(x_0)$ – нормальной прибыли, $x_0=\{x_{0i}\}$ – нормативным затратам в условиях совершенной конкуренции. Превышение $f(y)>0$ реальных затрат x над номинальными x_0 указывает на неэффективность производства по отношению к средовому фону. Согласно (2) при $x_0>0$ рост цен a приводит к снижению прибыли $\Phi(a)$ – экономическому индексу системы.

Переменная $a_i = \frac{\partial F(x)}{\partial x_i} = \frac{\partial f(y)}{\partial y_i}$ обозначает чувствительность реакции функций $F(x)$ и $f(y)$ на изменение x . Переменные $a=\{a_i\}$ – это внутренние характеристики системы, не зависящие от выбора системы координат $x=\{x_i\}$ и в различных науках трактуемые по-разному: интенсивные потенциалы в физике, теневые цены, показатели акселерации инвестиций и

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

предельной полезности товаров в экономике. Геометрически они задают наклон и направление линий и плоскостей в пространстве признаков (см. рис. 1), а $\Phi(a)$ – их обобщенная функция, соответствующая точке пересечения оси ординат $F(0)=\Phi(a)$, т.е. свободный член уравнения (1) $b=\Phi(a)$ – I-индекс, зависящий от параметров внутренней среды. Величина $\Phi(a)$ интегрирует свойства внешней x_0 и внутренней a среды системы и является своеобразным генетическим показателем, поскольку согласно (1) по скрытой функции $\Phi(a)$ можно восстановить наблюдаемую зависимость $F(x)$ или указать согласно (2) на средовые нормы x_0 , по совокупности которых сгенерировать средовое многообразие $F(x_0)$. В функцию $\Phi(a)$ традиционно относятся неучтенные в соотношении $F(x)$ факторы.

Для статистических расчетов коэффициентов $a=\{a_i\}$ на основе (1) используются регрессионные уравнения. Интерпретация результатов обычно ограничивается сравнением вычисленных значений a . Аналитический подход позволяет извлечь дополнительные знания, например, проверить соотношение (2), достоверность которого указывает на существование средового инварианта (F_0, x_0) – центра пучка взаимосвязей. Если общего центра нет, то объекты разбиваются на группы с разными средовыми центрами, что позволяет решать задачи районирования. При $a=0$ величина $F(x)$ достигает экстремального значения $F(x) = F(x_0) = \Phi_0$. По близости величины a^2 к 0 можно судить об оптимальности режима автономного функционирования системы.

Выражение (1) математически истинно, как и уравнение полного дифференциала

$$dF = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(x)}{\partial x_i} dx_i = \sum_{i=1}^n a_i(x) dx_i = \sum_{i=1}^n a_i(y) dy_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} dy_i, dx_i = dy_i \quad (4)$$

Это уравнение истинно и в содержательном плане лежит в основе естественных закономерностей [21; 25]. В частности, если оно справедливо для широкой окрестности у точки x_0 ($dx_i \rightarrow y_i = x_i - x_{0i}$, $dF \rightarrow F - F_0$), то из (4) следует (3) – уравнение пучка, которое выполняется только при условии (2). Уравнения $f(y) = a \cdot y$ в (3) и (4) выражают правило преобразования координат $y=\{y_i\}$ в координаты $f=\{f_i\}$ по формуле ($n=2$):

$$f(y) = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = Ay = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}, J = |A| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}. \quad (5)$$

Здесь A – матрица Якоби, J – определитель Якоби. Матрица A – оператор преобразования наборов переменных $y \rightarrow f$, устанавливающая симметрию связи между различными закономерностями или участками территорий. Наглядными иллюстрациями являются движения тел, когда происходит гладкий переход одного их положения в другое, что описывается непрерывными группами преобразований (группами Ли) и отличается от уравнений механического движения. Степень связности оценивается по величине J^2 , что используется при выделении ландшафтных границ [13] или для определения сходства экономик [10]. Лучшие связи наблюдаются при $J^2=0$, когда в случае (5) $a_{11}a_{22}-a_{21}a_{12}=0$, т.е. $a_{11}/a_{12}=a_{21}/a_{22} = -k$, где k – коэффициент замещения $k_1 = -\frac{\partial y_1}{\partial y_2} = -\frac{\partial f_1}{\partial y_1} / \frac{\partial f_1}{\partial y_2}$ фактора y_2 на

фактор y_1 при сохранении значения функции $f_1 = \text{const}$. При равенстве коэффициентов $k_1 = k_2$ для разных функций f_1 и f_2 выполняется условие $J^2=0$.

Помимо аналитического подхода, использующего координаты и формулы, существует синтетическая (чистая, очевидная, школьная) геометрия, изучающая преобразования различных форм. В общесистемном смысле здесь важными являются процедуры сравнения с выявлением аналогии и гомологии систем, т.е. их функционального и структурного подобия [7]. Синтетическими географическими науками считаются комплексные

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

дисциплины – ландшафтоведение, краеведение и страноведение, которые используют материалы естественных и общественных географических и смежных наук. При синтетическом подходе логические построения ведутся при помощи наглядных геометрических рассуждений: чертежей, графиков, графов, формальных категорий и т.д.

Подобие композиций формируют элементарные комплексы (конфигурации), а их взаимосвязи – комплексы более высокого порядка. В терминах математической теории категорий и топосов [20; 28] структурные композиции разного вида являются объектами категории, конфигурации (комплексы) – категориями. Топосы – это категории с дополнительными структурами (классификаторами), устанавливающими ложность или истинность $[0,1]$ морфизмов. Средствами отображения знаний являются блок-схемы и коммутативные диаграммы теорий категорий, функторов и топосов. В терминах этих теорий основная задача комплексных географических исследований состоит в выявлении порядка и характера связности (полиморфизма) географических систем безотносительно к их сложной внутренней структуре.

Связь задается отображением (морфизмом) $F_{ij}: Z_i \rightarrow Z_j$ – сравнением двух конфигураций (слоев, композиций, комплексов) Z_i, Z_j (рис. 2, а). Выражение $\Delta Z_{ij} = Z_j/Z_i$ показывает, насколько отличается j -я композиция от i -й. Композиция ΔZ_{ij} фиксирует различия, а функция F_{ij} выражает отображение сравнения: $\Delta Z_{ij} \leftrightarrow F_{ij}$. Для исчисления F_{ij} используются свойственные функции F_i и F_j комплексов, устанавливающие морфизмы между ними и эталонной конфигурацией Z : суперпозиция прямых и обратных связей $F_{ij} = F_i \circ F_j^{-1}$.

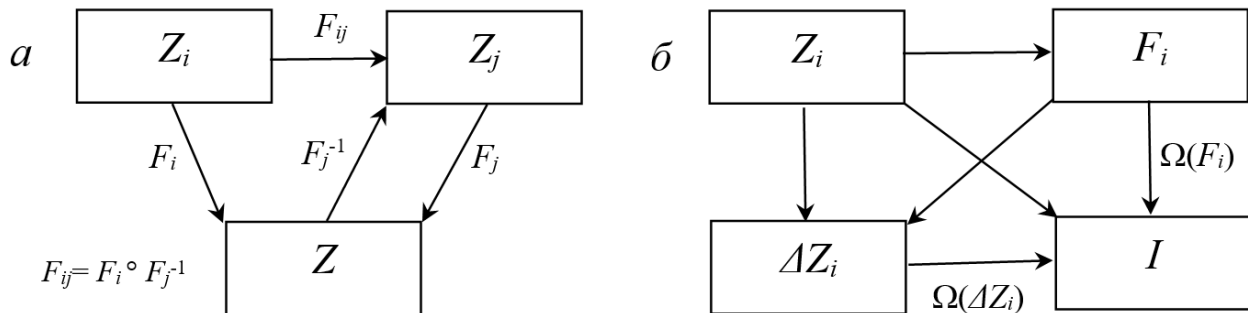


Рис. 2. Коммутативные диаграммы формальной категории: а – объекты–комплексы Z_i и Z_j с демонстрацией суперпозиции их связей $F_{ij} = F_i \circ F_j^{-1}$; б – связи комплексов Z_i , их свойственных функций F_i и различий ΔZ_i согласно тождеству (6). Стрелками показаны морфизмы понятий, в том числе классификатор $\Omega()$, сопоставляющий свойствам комплекса одно и то же значение I_i из числового интервала $I=[0, 1]$ (пояснения в тексте)

Fig. 2. Commutative diagrams of the formal category of а – objects-complexes Z_i and Z_j with a demonstration of the superposition of their connections $F_{ij} = F_i \circ F_j^{-1}$, б – connections of the complexes Z_i , their inherent functions F_i , and differences ΔZ_i according to the identity (6). The arrows show morphisms of the concepts, including the classifier $\Omega()$, which matches the properties of the complex with the same value I_i from the numerical interval $I=[0, 1]$ (explanations in the text)

Порядок в последовательности комплексов Z_i индуцируется числовым эталоном сравнения I (рис. 2, б):

$$Z_i \leftrightarrow \Delta Z_i \leftrightarrow F_i \leftrightarrow I_i \in I = [0,1]. \tag{6}$$

Это базовая аксиома общей теории комплексов. Согласно (6), свойства их рядов зависят от особенностей числового ряда $I = [0,1]$. Множество непересекающихся слоев счетно, мощность композиций (множества всех подмножеств) и их связей (комплексов) – континуальна. В этом – основа двойственности непрерывных и дискретных качеств комплексов. Учет различий ΔZ_i вплоть до бесконечно малых приращений dx_i требует увеличить мощность I до гипердействительных чисел [21]. При $\Delta Z_i \leftrightarrow dx_i$ справедлива

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

дифференциальная форма (4), что подчеркивает основополагающее значение уравнения (4) для количественного анализа взаимосвязей и позволяет учесть разные изменения (различия).

Соответствие (6) дает возможность считать комплексы метризованными, индуктивными, коммутативными, транзитивными, линейно упорядоченными, дискретно-непрерывными, ограниченными, изменяющимися гомотопическими системами информационного обмена [7], когда воздействия транзитивно передаются по гомологическому ряду комплексов.

Сквозной географический сравнительный метод основан на идее связности $F_{ij}: Z_i \rightarrow Z_j$ и лежит в основе полевых, статистических, аэрокосмических и других методов исследования. Выделяются два сравнительно-сопоставительных подхода: 1) кардиналистский метод, основанный на сравнении объектов по совокупности их частных характеристик и 2) ординалистский метод, базирующийся на ранжировании объектов по их свойствам. Сравнение широко используется в разных видах индикации по известному принципу «почва – зеркало ландшафта» (В.В. Докучаев).

Закон географической зональности выстраивает природные зоны в гомологический ряд в границах климатического пояса [8; 14], упорядочивает их по секторам как в пространстве признаков (температура, влажность), так и территориально на поверхности земной сферы. Система классификации геокомплексов строится на основе их сравнения с зональным эталоном – коренной географической системой. Факторально-динамический ряд фаций – это гомологический ряд, выделенный по степени воздействия конкретного фактора [12].

Идеи комплексности (порядка и подобия) реализуются в различных науках, но прежде всего в специальной теории сложных систем, основанной на анализе ранговых распределений, когда $Z(I_i)$ задается функцией $P = P(r, I_i)$, где r – ранговый номер (позиция), а I_i индивидуализирует i -й тип распределения $P(r, I_i) = P_i(r)$, – представительства явлений r -го ранга в системе. Функция $P_i(r)$ есть реализация отображения $r \rightarrow P_i(r) \in I$, т.е. $0 \leq P_i(r) \leq 1$. Функция $P_i(r)$ в этом случае имеет смысл значимости (рейтинга) явления и воспринимается как закон упорядоченности структуры ранговых позиций: номера r расположены в порядке убывания $P_i(r)$. Ранги соответствуют разнообразным слоям-типам (фациям, видам растений, политическим партиям). Величина $P_i(r)$ рассчитывается как частота встречаемости этих типов, их относительная площадь или масса. В частности, $P_i(r)$ соответствует доле площади, занимаемой r -го типа фацией в урочище. Такие распределения используются при ординалистском сравнении явлений по критерию относительной значимости (полезности) или при решении задач районирования по методу встречаемости (повторяемости) ландшафтно-типологических единиц на территории.

Зависимости $P_i(r)$ аппроксимируются разными формулами $P_i(z)$ [24], в частности, степенным уравнением закона Ципфа «ранг – частота» для описания распределения экономических сил и социального статуса:

$$a) P_i(z) = \frac{C}{z^{k+1}}, \quad б) \ln P_i(z) = \ln C - (k + 1) \ln z, \quad (7)$$

где $z \geq z_m$ – ранг (переменная величина); $k > 0$ – показатель степени; C – константа. Логарифмированием (7а) и заменой переменных $F(x) = \ln P_i(z)$, $x = \ln z$, $b = \ln C$, $a = -(k + 1)$ переводим (7а) в линейную зависимость (7б) $F(x) = ax + b$, которую исследуем приведенными средствами, когда I-индекс равен $b(a) = \ln C$. Этот пример показывает, что наблюдаемые зависимости обычно являются нелинейными, но линеаризуются соответствующими преобразованиями.

Объекты и результаты исследований

Для сравнительно-географического анализа выбраны ландшафты территории Прибайкалья (рис. 3). При исследовании межкомпонентных и пространственных связей

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

подготовлены данные, характеризующие геокомплексы: растровые геоизображения с координатной привязкой MODIS «снежный покров» с пространственным 500 м и временным разрешением 8 дней за август–декабрь 2000–2009 гг. (200 снимков) и за февраль–май 2001–2010 гг. (150 снимков) (MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m Grid, Version 6) [30]. Каждому пикселу ($500 \times 500 \text{ м}^2$) соответствует одно из пяти значений состояния подстилающей поверхности: снег, отсутствие снега, вода, лёд водоёма и облачность. По этим данным для каждого пиксела рассчитана продолжительность залегания устойчивого снежного покрова (УСП) в Прибайкалье за 2000–2010 гг., а также средняя многолетняя продолжительность залегания УСП зимой 2000–2010 гг. [34] (см. рис. 3). Температура поверхности попиксельно рассчитывалась по данным MODIS (MOD11B3: MODIS/Terra Land Surface Temperature and Emissivity Monthly L3 Global 6 km Grid SIN V006) [35] как средние значения дневных и ночных температур в январе и феврале 2000–2010 гг.

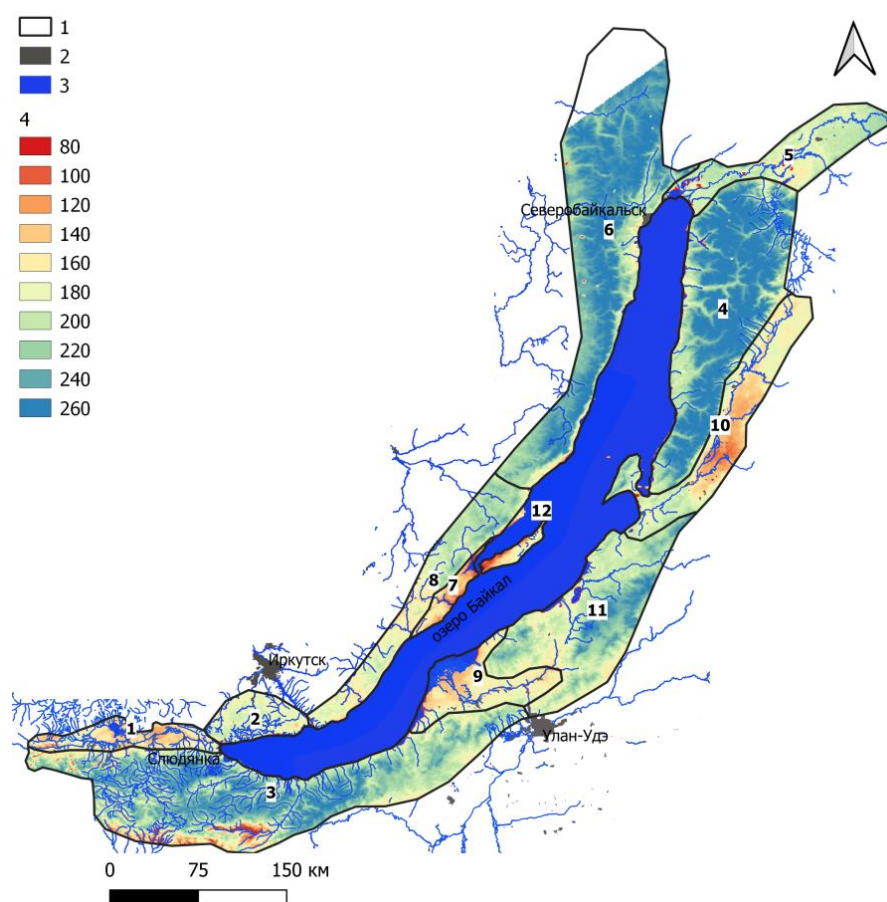


Рис. 3. Средняя продолжительность залегания УСП (дни) за зимний период 2000–2010 гг. и расположение геоморфологических районов Прибайкалья: 1 – Тункинская котловина; 2 – Олхинское плато; 3 – хребет Хамар-Дабан; 4 – Баргузинский хребет; 5 – Верхнеангарская котловина; 6 – Байкальский хребет; 7 – Приольхонье; 8 – Приморский хребет; 9 – Селенгинская низменность; 10 – Баргузинская котловина; 11 – Хребет Улан-Бургасы

Условные обозначения: 1 – границы единиц геоморфологического районирования; 2 – населённые пункты; 3 – водные объекты; 4 – средняя продолжительность залегания УСП (дни) за зимний период 2000–2010 гг.

Fig. 3. The average duration of occurrence of stable snow cover for the winters of 2000–2010 and the location of the geomorphological regions of the Baikal region: Tunka depression (1), Olkha plateau (2), Khamar-Daban ridge (3), Barguzin ridge (4), Verkhneangara depression (5), Baikal ridge (6), Olkhon region (7), Primorsky ridge (8), Selenga lowland (9), Barguzin depression (10), Ulan-Burgasy ridge (11).

Legend: 1 – boundaries of geomorphological zoning units; 2 – settlements; 3 – water bodies; 4 – the average duration of occurrence of stable snow cover (days) for the winter periods of 2000–2010

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

Связи между исходными $x=\{x_i\}$ и зависимыми $F=\{F_i(x)\}$ переменными описываются по (5) системой линейных уравнений вида (1):

$$F_1(x) = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_1, F_2(x) = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_2. \quad (8)$$

В качестве независимых переменных x рассматривались высота местности x_1 над у.м. (метры) из данных ЦМР WorldClim [36] с разрешением 1 км и потенциальный суммарный приход солнечной радиации x_2 (кВт ч/м² в день), рассчитанный по программе SAGAGIS на основе ЦМР. В качестве зависимых переменных использовались средняя продолжительность (дни) залегания УСП F_1 и температура земной поверхности F_2 , °С по данным MODIS.

Для оценки коэффициентов a_{ji} уравнений (8) связи характеристик геокомплексов проводится регрессионный анализ (таблица). Значения парной и множественной корреляции R и коэффициенты регрессии a_{ji} и b_j рассчитывались для территории в целом и по отдельным участкам геоморфологического районирования, представленным разными ландшафтами (рис. 3). По статистическому критерию Фишера и оценке вероятности ошибки при большом числе пикселей подтверждается высокая достоверность коэффициентов корреляции.

Результаты расчета коэффициентов регрессионных уравнений попиксельных связей длительности залегания УСП и температуры поверхности и высоты местоположения и солнечной радиации и определителей величины этих связей (пояснения в тексте)

The coefficients of the regression equations of pixel-by-pixel relationships between the duration of stable snow cover occurrence and the surface temperature and the altitude of the location and solar radiation, and determinants of the magnitude of these relationships (explanations in the text).

Участок			Длительность залегания УСП, д.				Температура поверхности, град С				Определители	
	Высота	Число	b_1	a_{11}	a_{12}	R	b_2	a_{21}	a_{22}	R	J^2	J_1^2
Территория Прибайкалья	–	612969	123,9	0,128	–18,82	0,73	12682,1	–0,166	2,66	0,33	–	–
Акватория оз.Байкал	–	147460	81,1	0,456	–58,90	0,69	12292,0	–0,218	129,32	0,04	–	–
Тункинская котловина	836	13681	222,1	0,046	–24,71	0,50	12204,8	0,490	–6,37	0,59	139,4 0	1,70 0
Олхинское плато	719	12348	319,3	0,103	–50,34	0,59	12409,5	0,061	66,00	0,29	96,70	6,34 5
Хребет Хамар-Дабан	1308	101494	245,4	0,032	–19,54	0,38	12892,0	–0,134	–11,60	0,41	8,90	1,20 4
Баргузинский хребет	1400	75306	196,8	0,053	–9,01	0,79	12447,4	–0,137	11,18	0,66	0,41	0,00 5
Верхнеангарская котловина	566	26991	203,5	0,081	–15,25	0,16	11985,4	0,198	30,22	0,38	30,00	0,00 0
Байкальский хребет	1132	85575	206,9	0,061	–10,68	0,69	12328,1	–0,117	31,47	0,37	0,43	0,00 3
Приольхонье	678	8270	138,4	0,177	–28,74	0,77	12246,5	–0,001	89,63	0,33	250,4 2	0,13 3
Приморский хребет	936	30818	174,4	0,110	–21,33	0,82	12455,4	–0,294	93,15	0,49	15,77	0,00 3
Селенгинская низменность	545	20827	183,7	0,150	–27,82	0,47	12690,5	0,183	–48,14	0,29	4,52	0,00 1
Баргузинская котловина	626	36242	177,6	0,092	–16,85	0,61	12245,3	0,321	–26,82	0,45	8,63	0,00 1
Хребет Улан-Бургасы	946	53968	172,4	0,078	–11,54	0,71	12635,9	–0,065	–2,01	0,23	0,83	0,06 4

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

По коэффициентам уравнений (8) разных ландшафтов рассчитываются зависимости (2) $b=\Phi(a)$ для F_1 и F_2 : $b_1 = -900,4a_{11} - 3,84a_{12} + 201,7$ ($R=0,94$), $b_2 = -900,6a_{21} - 4,00a_{22} + 12536,7$ ($R=0,79$). Величины x_{01} и x_{02} в обоих случаях имеют близкие значения со средними $x_{01} = 900,6$ и $x_{02} = 3,92$. Отсюда следует, что данные зависимости формируются в однотипной региональной среде с параметрами (900,6; 3,92). Соответственно смещенные оценки будут $y_1 = x_1 - 900,6$, $y_2 = x_2 - 3,92$ и $f_1(y) = F_1(x) - 201,7$, $f_2(y) = F_2(x) - 12536,7$. Отсюда и из (8) получаем общую формулу пучка линейных зависимостей, общих для различных сред: $f_1(y) = a_{11}y_1 + a_{12}y_2$, $f_2(y) = a_{21}y_1 + a_{22}y_2$. Выявленная конгруэнция разных ландшафтов обосновывает комплексность климатических характеристик Прибайкалья. Степень связности F_1 и F_2 оценивается по критерию J^2 . Низкие значения критерия, т.е. более высокая связность, характерны для равнинных территорий.

Во всех прибайкальских ландшафтах продолжительность залегания УСП положительно $a_{11} > 0$ зависит от высоты и отрицательно $a_{12} < 0$ – от потока солнечной радиации. Для температуры поверхности их влияние a_{21} , a_{22} разнонаправленно. Коэффициенты замещения факторов $k_1 = -a_{11}/a_{12} = 0,00467$, $k_2 = -a_{21}/a_{22} = 0,00549$ имеют близкие значения. При сравнении по критерию J_1^2 (таблица) сходство коэффициентов замещения факторов определяет подобие связей в ландшафтах, например, в группу объединяются соседние территории Тункинской котловины, Олхинское плато и хребта Хамар-Дабан.

При $a=0$ величина $f(y)=0$ и функция $F(x)$ достигает экстремальных значений $F_{01} = 201,7$, $F_{02} = 12536,7$, с которыми сравниваются индексы $b=\Phi(a)$ разных местоположений. Оптимумы соответствуют ландшафтам котловин Байкальского типа. Значения индексов имеют слабую тенденцию увеличиваться с высотой ($R > 0,45$), отражая, в частности, ландшафтные различия в количестве твердых осадков. В качестве эталона сравнения выбраны комплексы Верхнеангарской котловины, параметры которых близки к оптимальным, и рассчитан для F_1 критерий J_1^2 (таблица). По этому критерию ландшафты центрального и северного Прибайкалья весьма близки (рис. 4). Величина $b_1 = -541,3a_{11} + 237,1$ ($R = -0,84$), без Олхинского плато, поэтому увеличение a_{11} понижает величину индекса положения, а более высокий индекс (прибыль) указывает на лучшее состояние комплекса. Ландшафты по этому индексу упорядочиваются от горной тайги Хамар-Дабана ($b_1 = 245,4$) к степным ландшафтам Приольхонья ($b_1 = 138,4$).

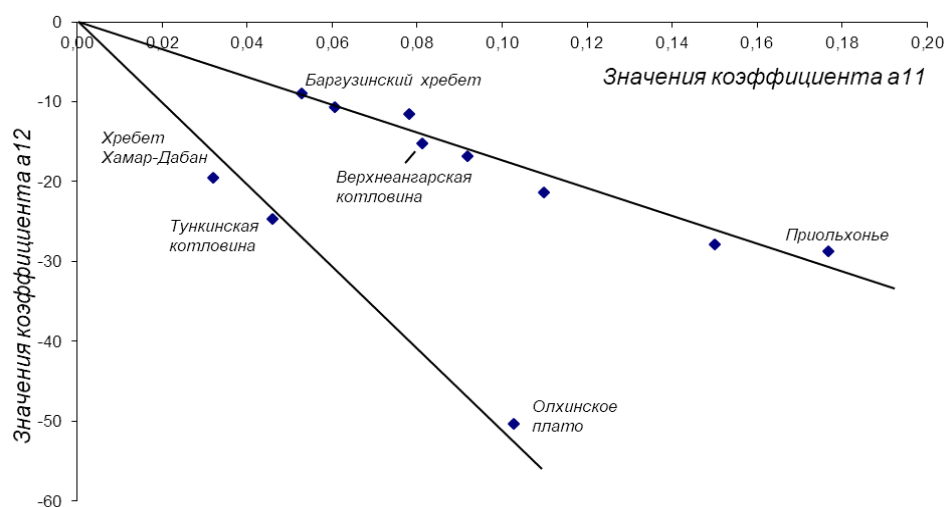


Рис.4. Связь значений коэффициентов a_{11} и a_{12} зависимости (8) длительности залегания УСП от высоты местоположения и потока солнечной радиации.

Линиями обозначены две группы функционально связанных ландшафтов

Fig. 4. Relationship between the values of the coefficients a_{11} and a_{12} of the dependence (8) of the duration of occurrence of stable snow cover on the altitude of the location and the flux of solar radiation. The lines indicate two groups of functionally related landscapes

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

Заключение

Комплексы моделируются как системы особого рода – сложные системы связности упорядоченных разнородных частей целого. Связь комплекса с гомотопическим показателем (I-индексом) из множества гипердействительного числового ряда определяет его универсальные свойства: индивидуальность, изменчивость, ограниченность, метризуемость, транзитивность, дискретно-непрерывную линейную упорядоченность и т.д. Эти положения формируют теоретический базис исследования и математического моделирования географических комплексов с аналитических и синтетических позиций. Аналитические методы используют формулы высокой абстракции, придавая им содержательный смысл непрерывных и дискретных преобразований в потоке явлений природы и общества, что позволяет применять регрессионный анализ для осмысленной обработки связи пространственных данных и количественного сравнения ландшафтов и регионов между собой и с эталонами. Через касательное расслоение обосновывается способ учета состояния среды при моделировании сложных систем. Синтетический подход использует графики, графы, схемы и коммутативные диаграммы для создания концептуальных моделей комплексов, многие из которых уже применяются в географии. Такие схемы имеют самостоятельное теоретическое значение и отражают общие идеи комплексирования: геокомплексы являются особого рода топосами.

В сравнительном анализе наиболее интересными являются связанная с этой идеей проблема соотношения геокомплексов с их положением в индексном пространстве и обратная задача влияния индексного положения на состояние географических систем. Для оценки индексов впервые используется функция $\Phi(a, x_0)$, величина которой определяется параметрами внешней и внутренней среды геокомплексов, демонстрирует эффект функционирования и статистически рассчитывается с помощью регрессионных уравнений по пространственным данным.

Список источников

1. Александрова Т.Д. Статистические методы изучения природных комплексов. М.: Наука, 1975. 96с.
2. Арманд А.Д. Информационные модели природных комплексов. М.: Наука, 1975. 126 С.
3. Арманд Д.Л. Географическая среда и рациональное использование природных ресурсов. М.: Наука, 1983. 238 с.
4. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте (Основы теории и логико–математические методы). М.: Мысль, 1975. 286 с.
5. Бунге В. Теоретическая география. М.: Прогресс, 1967. 280 с.
6. Ващенко М. П., Пронин Я. С., Шананин А. А. Математическая модель экономики железнодорожных грузоперевозок // Тр. ИММ УрО РАН, 2014. Т. 20. № 4. С. 44– 59.
7. Гомология и гомотопия географических систем / ред. А.К. Черкашин, Е.А. Истомина. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2009. 351 с.
8. Григорьев А.А., Будыко М.И. О периодическом законе географической зональности // ДАН СССР. 1956. Т. 110. № 1. С. 129–132.
9. Григорьев А.А. Закономерности строения и развития географической среды. М.: Мысль, 1966. 384 с.
10. Джонстон П. Т. Теория топосов. М.: Наука, 1986. 440 с.
11. Коломыц Э.Г. Экспериментальная географическая экология. Записки географа–натуралиста. М.: Товарищество науч. изданий КМК, 2018. 716 с.
12. Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 233 с.
13. Левич А.П. Теория множеств, язык теории категорий и их применение в теоретической биологии. М.: Изд–во Моск. ун-та, 1982. 190 с.

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

14. Мильков Ф.Н. Природные зоны СССР. М.: Мысль, 1977. 293 с.
15. Мильков Ф.Н. Словарь–справочник по физической географии. М.: Мысль, 1970. 342 с.
16. Нееф Э. Теоретические основы ландшафтоведения. М.: Прогресс, 1974. 220 с.
17. Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В. Информационно–логический анализ в медико–географических исследованиях // Итоги науки. Медицинская география. Вып. 3. М.: ВИНТИ, 1969. С. 5–74.
18. Солнцев Н.А. Учение о ландшафте (избранные труды). М.: Изд–во Моск. ун–та, 2001. 384 с.
19. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
20. Черкашин А.К., Истомина Е.А. Выделение границ функционально однородных ареалов на космических снимках на основе вычисления определителя Якоби // География и природные ресурсы. 2013. № 1. С. 157–165
21. Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2(14). С. 69–87.
22. Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1(13). С. 61–84.
23. Черкашин А.К. Полисистемный анализ и синтез. Приложение в географии. Новосибирск: Наука, 1997. 502 с.
24. Черкашин А.К., Истомина Е.А. Исследование и моделирование трансформации структуры и организации ландшафтных комплексов// Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 1. С. 140–152.
25. Черкашин А.К., Солодянкина С.В. Функциональная география как направление теоретических исследований и моделирования // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 181–190.
26. Щедровицкий Г.П. Схема мышления – системно–структурное строение, смысл и содержание // Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник, 1986. М.: Наука, 1987. С. 124–146.
27. Экологический энциклопедический словарь. М.: Издательский дом «Ноосфера», 1999. 930 с.
28. Cherkashin A.A. Trans-Siberian railway and interrelation of economic development of regions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2018. V.190. p. 1–6. [Электронный ресурс], URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/190/1/012050/pdf> (дата обращения: 01.10.2017).
29. Cherkashin A.K. Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society // Mathematical modelling of natural phenomena. 2009. V. 4. No. 5. pp. 4–20.
30. Hall D.K., Riggs G.A. MODIS / Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m Grid, Version 6 // Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. [Электронный ресурс]. URL: <http://nsidc.org/data/MOD10A2/versions/6> (дата обращения: 01.10.2017).
31. Jorgensen S.E. Complex ecology in the 21st century // Complex Ecology: The Part–Whole Relation in Ecosystems. NJ: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995. p. xvii–xix.
32. Key texts in human geography. London: SAGE Publications Ltd, 2008. 236 p.
33. Mboup P.A., Konaté K., Fur J. A multi-world agent-based model working at several spatial and temporal scales for simulating complex geographic systems// Procedia Computer Science. 2017. V. 108. p. 968–977.
34. Rasputina E.A. Geoinformation analysis of the period of a stable snow cover in the Baikal region// IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. V. 629. p. 1–7. [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/629/1/012069/pdf> (дата обращения: 01.10.2017).

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

35. Wan Z., Hook S., Hulley G. MOD11B3 MODIS / Terra Land Surface Temperature/Emissivity Monthly L3 Global 6 km SIN Grid V006 // Earth Explorer. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 01.10.2017).
36. WorldClim – global climate data. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.worldclim.org> (дата обращения: 01.10.2018).
37. Wu J., David J.L. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications// Ecological Modelling. 2002. p. 7–26.

References

1. Alexandrova, T.D. (1975), *Statisticheskie metody izuchenija prirodnyh kompleksov* [Statistical methods for studying natural complexes], Nauka, Moscow, Russia.
2. Armand, A.D. (1975), *Informacionnye modeli prirodnyh kompleksov* [Information models of natural complexes], Nauka, Moscow, Russia.
3. Armand, D.L. (1983), *Geograficheskaja sreda i racional'noe ispol'zovanie prirodnyh resursov* [Geographic environment and rational use of natural resources], Nauka, Moscow, Russia.
4. Armand, D.L. (1975), *Nauka o landshafte (Osnovy teorii i logiko–matematicheskie metody)* [Landscape Science (Fundamentals of Theory and Logical and Mathematical Methods)], Mysl', Moscow, Russia.
5. Bunge, V. (1967), *Teoreticheskaja geografija* [Theoretical geography], Progress, Moscow, Russia.
6. Vaschenko, M.P., Pronin, Ya.S., Shananin, A.A. (2014), Mathematical model of the economy of railway cargo transportation, *Pr. IMM UB RAN*, vol. 20, no. 4, pp. 44–59.
7. *Gomologija i gomotopija geograficheskikh sistem* (2009) [Homology and homotopy of geographical systems], Academic publishing house "Geo", Novosibirsk, Russia.
8. Grigoriev, A.A., Budyko, M.I. (1956), On the periodic law of geographic zoning, *DAN SSSR*, vol. 110, no. 1, pp. 129–132.
9. Grigoriev, A.A. (1966), *Zakonomernosti stroenija i razvitija geograficheskoy sredy* [Regularities of the structure and development of the geographic environment], Mysl', Moscow, Russia.
10. Johnston, P.T. (1986), *Teorija toposov* [Theory of toposes], Nauka, Moscow, Russia.
11. Kolomyts, E.G. (2018), *Jeksperimental'naja geograficheskaja jekologija. Zapiski geografa–naturalista* [Experimental Geographic Ecology. Notes of a geographer-naturalist], Tovarišhestvo nauch. Izdanij, KMK, Moscow, Russia.
12. Krauklis, A.A. (1979), *Problemy jeksperimental'nogo landshaftovedenija* [Problems of Experimental Landscape Science], Nauka, Novosibirsk, Russia.
13. Levich, A.P. (1982), *Teorija mnozhestv, jazyk teorii kategorij i ih primenenie v teoreticheskoy biologii* [Set theory, the language of category theory and their application in theoretical biology], Izd–vo Mosk. un–ta, Moscow, Russia.
14. Milkov, F.N. (1977), *Prirodnye zony SSSR* [Natural zones of the USSR], Mysl', Moscow, Russia.
15. Milkov, F.N. (1970) *Slovar'–spravochnik po fizicheskoy geografii* [Dictionary-reference book on physical geography], Mysl', Moscow, Russia.
16. Neef, E. (1974), *Teoreticheskie osnovy landshaftovedenija* [Theoretical foundations of landscape science], Progress, Moscow, Russia.
17. Puzachenko, Yu.G., Moshkin, A.V. (1969), Information-logical analysis in medical-geographical research, *Itogi nauki. Medicinskaja geografija* [Itogi nauki. Medical geography], Issue 3, VINITI, Moscow, Russia, pp. 5–74.
18. Solntsev, N.A. (2001), *Uchenie o landshafte (izbrannye trudy)* [The doctrine of the landscape (selected works)], Izd–vo Mosk. un–ta, Moscow, Russia.
19. Sochava, V.B. (1978), *Vvedenie v uchenie o geosistemah* [Introduction to the theory of geosystems], Nauka, Novosibirsk, Russia.
20. Cherkashin, A.K., Istomina, E.A. (2013), Identification of the boundaries of functionally

homogeneous areas in space images based on the calculation of the Jacobi determinant, *Geography and natural resources*, no. 1, pp. 157–165.

21. Cherkashin, A.K. (2019), Innovative mathematics: search for the foundations and limitations of reality modeling, *Information and mathematical technologies in science and management*, no. 2(14), pp. 69–87.

22. Cherkashin, A.K. (2019), Metatheoretical system modeling of natural and social processes and phenomena in a heterogeneous environment, *Information and mathematical technologies in science and management*, no. 1(13), pp. 61–84.

23. Cherkashin, A.K. (1997), *Polisistemnyj analiz i sintez. Prilozhenie v geografii* [Polysystem analysis and synthesis. Application in geography], Nauka, Novosibirsk, Russia.

24. Cherkashin, A.K., Istomina, E.A. (2017), Research and modeling of transformation of the structure and organization of landscape complexes, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, geographical series*, no. 1, pp. 140–152.

25. Cherkashin, A.K., Solodyankina, S.V. (2018), Functional geography as a direction of theoretical research and modeling, *Geography and natural resources*, no. 2, pp. 181–190.

26. Shchedrovitsky, G.P. (1987), Scheme of thought activity – systemic-structural structure, meaning and content, *Sistemnye issledovaniya. Metodologicheskie problemy. Ezhegodnik* [System research. Methodological problems. Yearbook], Nauka, Moscow, Russia, pp. 124–146.

27. *Jekologicheskij jenciklopedicheskij slovar'* [Ecological encyclopedic dictionary] (2014), Izdatel'skij dom «Noosfera», Moscow, Russia.

28. Cherkashin, A.A. (2018), Trans-Siberian railway and interrelation of economic development of regions, *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, vol. 190, pp. 1–6, available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/190/1/012050/pdf> (Accessed 01 October 2017).

29. Cherkashin, A.K. (2009), Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society, *Mathematical modelling of natural phenomena*, vol. 4, no 5, pp. 4–20.

30. Hall, D.K., Riggs, G.A., MODIS, Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500m Grid, Version 6, Boulder, Colorado USA, NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, available at: <http://nsidc.org/data/MOD10A2/versions/6> (Accessed 1 October 2017).

31. Jorgensen, S.E. (1995), Complex ecology in the 21st century, *Complex Ecology: The Part–Whole Relation in Ecosystems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 17–19.

32. *Key texts in human geography* (2008), SAGE Publications Ltd, London.

33. Mboup, P.A., Konaté, K., Fur, J. (2017), A multi-world agent-based model working at several spatial and temporal scales for simulating complex geographic systems, *Procedia Computer Science*, vol. 108, pp. 968–977.

34. Rasputina, E.A. (2021), Geoinformation analysis of the period of a stable snow cover in the Baikal region, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 629, pp. 1–7, available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/629/1/012069/pdf> (Accessed 01 October 2017).

35. Wan, Z., Hoo, k S., Hulley, G. MOD11B3 MODIS, Terra Land Surface Temperature/Emissivity Monthly L3 Global 6 km SIN Grid V006, *Earth Explorer*, available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed 1 October 2017).

36. WorldClim – global climate data, available at: <http://www.worldclim.org> (Accessed 1 October 2018).

37. Wu, J., David, J.L. (2002), A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications, *Ecological, Modelling*, 153, pp. 7–26.

Статья поступила в редакцию: 05.07.2021; одобрена после рецензирования: 05.02.2022; принята к опубликованию: 09.03.2022.

The article was submitted: 5 July 2021; approved after review: 5 February 2022; accepted for publication: 9 March 2022.

Теоретическая география
Черкашин А.К., Распутина Е.А.

Информация об авторах

Information about the authors

Александр Константинович Черкашин

д.г.н., проф., заведующий лабораторией теоретической географии, Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук;

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Уланбаторская, 1

e-mail: akcherk@irnok.net

Aleksander K. Cherkashin

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Theoretical Geography, V.B. Sochava Institute of Geography Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Ulanbatorskaya st., Irkutsk, 664033, Russia

Елена Александровна Распутина

к.г.н., старший научный сотрудник лаборатории теоретической географии, Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук;

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Уланбаторская, 1

e-mail: elenaistoma@gmail.com

Elena A. Rasputina

Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Theoretical Geography, V.B. Sochava Institute of Geography Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;

1, Ulanbatorskaya st., Irkutsk, 664033, Russia

Вклад авторов

Черкашин А.К. – идея, написание статьи, научное редактирование текста.

Распутина Е.А. – сбор и обработка пространственных данных, геоинформационное картографирование, написание текста статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Cherkashin A.K. – idea, article writing, scientific text editing.

Rasputina E.A. – spatial data collection and processing, geoinformation mapping, article writing.

The authors declare no conflict of interest.