

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.2:004.932(571.54)

МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕОСИСТЕМ

А.К. Черкашин¹, Е.А. Распутина²

^{1,2} Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, лаборатория теоретической географии

¹ Профессор, гл. науч. сотр., д-р геогр. наук; e-mail: akcherk@irnok.net

² Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: elenarasputa@yandex.ru

Важное направление ландшафтных исследований – разработка новых методов количественного анализа пространственной информации на развивающейся теоретической основе, в данном случае – теории сложных геосистем-комплексов, их моделей линейной упорядоченности и связности различных частей территориального целого. Метод основан на процедурах касательного расслоения геосистемных функций связи географических характеристик и их преобразовании, позволяющем выделять генетическую основу (геоном) ландшафтной структуры и организации по космическим снимкам. Растровые геоизображения разворачиваются в линейную последовательность пикселей, и проводится расчет линейной зависимости значений яркости этих элементов в разных каналах снимка методом скользящей регрессии. Выделен геоном и проведено растровое картографирование коэффициентов регрессии как параметров порядка горных ландшафтов южного макросклона Тункинских гольцов Восточного Саяна. Вычисленная по пространственным данным многолучевая функция геонома отображает скрытую сущность исходного геоизображения, которое может быть восстановлено по этой функции с 88%-ной точностью. Каждый луч выделяет геоном соответствующего геомера, по которому появляется возможность сравнивать и типизировать геосистемы, а также проследивать их пространственную и временную изменчивость. Высокие значения параметров порядка связности относятся к геосистемам высокогорья, северных склонов и речных долин, а также они выделяют точечные границы ядер геомеров и линеаменты территориальной структуры.

Ключевые слова: модели сложных геосистем, геосистемные функции, касательное расслоение, параметры порядка, обработка растровых геоизображений, Восточный Саян

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.5.4

ВВЕДЕНИЕ

Система – это множество элементов и множество связей элементов; в зависимости от свойств элементов и их связей формируются системы различного рода, что определяет их пространственное и содержательное разнообразие. Причем не так сложно определить элементный состав, сколько выявить структуру связей системы, воспринимаемую как организацию, что постоянно отмечалось в работах многих российских физикогеографов (Л.С. Берг, Н.А. Солнцев, Л.Д. Арманд, А.Д. Арманд, А.Г. Исаченко, Н.Ф. Глазовский, Ю.Г. Пузаченко, Э.Г. Коломыц, В.С. Преображенский и др.). Так, В.Б. Сочава считал, что «предметом физической географии... являются не столько компоненты природы сами по себе, сколько присущие им связи, посредством которых формируются соподчиненные друг другу целостности – геосистемы» [1978, с. 49]. В.Н. Солн-

цев понимал ландшафтную структуру территории как определенный способ функциональной взаимосвязи (структуры связи) геокомпонентов и геокомплексов [Солнцев, 1981; Макунина, 2010].

Для решения подобных задач необходим переход от качественного понимания связей к их количественному выражению с использованием полевых и дистанционных данных [Хорошев и др., 2006; Хорошев, 2016; Remote Sensing..., 2016]. Для установления характера связей обычно используют методы многомерной статистики, включая множественный корреляционный, регрессионный, факторный, дискриминантный, нейросетевой, генетический и другие виды пространственного линейного анализа. В частности, проводится сопряженный среднемасштабный анализ характеристик комплексных полевых описаний с мультиспектральными спутниковыми снимками и характеристиками рельефа [Козлов и др., 2008].

Ландшафтная структура территории понимается как определенный способ функциональной взаимосвязи (структуры связи, организации) разнокачественных компонентов и геокомплексов (ПТК и ТПК), что моделируются как сложные геосистемы-комплексы порядка и связности [Черкашин, 2005; Истомина, Черкашин, 2005; Гомология..., 2009]. Показано, что интертеория¹ комплексов включает также знания о лингвистических и технических системах, основана на принципах расслоения признаков и физических пространств методами дифференциальной геометрии, изучает структуры линейного порядка, отраженные в свойствах числовых рядов [Черкашин, 2022]. Для оценки индексов порядка используются величины, значения которых определяются параметрами внешней и внутренней среды геокомплексов, которые рассчитываются с помощью регрессионных уравнений [Черкашин, Распутина, 2022].

Возникает проблема формальной и содержательной интерпретации выявленных статистических закономерностей, объяснения и понимания скрытых в них зависимостей, основываясь на математических знаниях, для обоснованной обработки рядов пространственно-временных данных и тематического картографирования выделенных связей.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сложное качество связности определяет свойства геосистем увязывать элементы между собой, отражает разнообразие (полиструктуру) видов связей и выражает степень сцепления элементов и систем. Понятие «связность» широко используется в разных науках, что позволяет путем сравнения выявить его смысл и применять в практике моделирования и количественного анализа. Говорят о связности изображения, изложения речи или текста, связности природных материалов, географических положений, исторических событий, членов сообщества, т. е. некоторой последовательности элементов или блоков-модулей, переходящих один в другой. Связность раскрывается через такие качества как прочность материала, неразрывность потоков, причинно-следственная зависимость, транспортная инфраструктура страны, сетевая коммуникация. Наглядно связность проявляется в структуре текста: логическая организация текста обеспечивается его логико-семантическими отношениями между частями предложения, высказываниями или более

крупными фрагментами текста, например, абзацами – группировками однородных единиц изложения, исчерпывающих один из его моментов (композиционный, сюжетно-тематический, ритмический и т. д.) и усиливающий его смысловой акцент. Выделяется группа мереологических логико-семантических отношений, в основе которых лежит операция соотнесения общего и частного, элементов и множеств, представленная в отношениях генерализации, спецификации, исключения и аддитивности, контрастивного описания показателей [Инькова, Манзотти, 2019]. Это закономерно проявляется при комплексном текстовом и картографическом описании ландшафтов с выделением территориальных контрастов, выраженных в геоморфологических, гидрологических и термических различиях, зональных и а зональных характеристиках и т. д. Разрабатываются методы адекватного «прочтения» ландшафтов [Yarham, 2018].

Простой топологической моделью системы является граф, в котором вершины (точки) соответствуют элементам, а связи передаются линиями (ребрами), соединяющими вершины. По графу создается соответствующая математическая модель, описывающая процессы и явления в исследуемой системе. Общая теория систем [Волкова, Денисов, 2005] выделяет особенности систем, выраженные в наличии: 1) набора элементов; 2) связей между ними; 3) целостности структуры; 4) пространственно-временной организации; 5) интегративных свойств. Связность графа-системы – это наличие пути от любой вершины к любой другой, от одного подмножества вершин к любому другому. Путь – это простейший граф в виде линейной последовательности вершин и соединяющих их ребер. Непрерывное топологическое пространство линейно связано, если две его любые точки можно соединить непрерывной кривой линией (путем). Поле ареалов ландшафтно-типологических геосистем-геомеров непрерывно связано отношением соседства (границами). Удаление границ делает типологическое пространство несвязанным, расслоенным на ареалы (компоненты связности). Графической моделью организации территории являет граф соседства ареалов геосистем (слоев, модулей) с внутренним качеством пространственной связности.

Различаются связанность (coupling) и связность (cohesion), что используются при проектировании программных комплексов, но применимы и при синтезе любых сложных систем. Связность характеризует внутреннюю целостность программного модуля, когда он выполняет соответствующие целевые функции. Связанность (зацепление) модулей определяет их внешнюю зависимость, и необходимо стремиться, чтобы модули имели минимальную

¹ Интертеория – сквозная теория, в единых понятиях описывающая географические и иные объекты как системы определенного рода (динамические, сложные, функциональные и др.), проявляющиеся в объектах природы, хозяйства и населения территории.

связанность, были максимально независимы, что достигается их декомпозицией, *расслоением* на независимые блоки (компоненты связности). Связанность характеризует систему, а связность – ее отдельный модуль: в географии это соответствует геохорам и геомерам, или поли- и моногеосистемам. Каждый гемер, как функционально-гомогенное образование, реализует в своих границах сложенный набор особых геосистемных функций, объединенных свойственным гемеру природным режимом. В гетерогенной геохоре (отдельном районе) геомеры сцеплены границами и обладают связанностью через эти границы вещественными, энергетическими и информационными потоками. На границах связность преломляется – один тип функции связи (гемер) переходит в другой, что фиксируется статистически [Истомина, Черкашин, 2013].

Графоаналитическая модель топологии инфраструктуры транспортной и телекоммуникационной сетей отображает связность и связанность городов и районов как качество взаимной транспортной и информационной доступности [Авдеев, Яблонский, 2022; Mогозов et al., 2023]. Аналогично геоэкологический каркас территории [Комиссарова и др., 2013] обеспечивает внутреннюю и внешнюю целостность ландшафтов, сохранение и неразрывность физических и биотических потоков по геологическим разломам (линеаментам, руслам), уклонам местности и градиентам плотности распределения элементов геосистем с учетом пропускной способности местных «каналов связи».

В общем виде связность формализуется в терминах расслоения дискретных множеств и многомерных непрерывных пространств на *непересекающиеся множества* (независимые слои) [Черкашин, 2005; Bittner, 2017]. Расслоением (fiber bundle) называется структура (E, B, π, T) , где E, B и T – топологические пространства (E – множество (пространство) расслоения, B – база расслоения, T – типовой слой), а $\pi: E \rightarrow B$ – отображение, удовлетворяющее условию тривиальности, когда для каждого элемента $e \in E$ имеется окрестность $U \subset B$ точки $\pi(e) \in U$ такой, что существует обратное отображение $\sigma: \pi^{-1}(U) \rightarrow U \cdot T$. Сечение $\sigma: B \rightarrow E$ превращает множество E в расслоенное пространство $TE = B \cdot F$ (прямое, декартово произведение) непересекающихся слоев $TE = \{T_b\}$, где каждый слой T_b связан с элементом $b \in B$ базы расслоения B и похож на типовой слой T : $TE = B \cdot T$ – расслоенное пространство над базой B . Операция расслоения напоминает процедуру картографической дифференциации территории на однородные ареалы, когда база расслоения B соответствует легенде ее карты E , в которой каждая позиция легенды $b \in B$ «высвечивает» $\sigma: B \rightarrow E$ ареалы геомеров T_b определенного типа b .

Типовой слой T ландшафтов обычно представляет ареалы геомеров зонального типа, вариациями которого являются азональные геомеры одного типа природной среды. Таким образом, тривиализация территории $TE = B \cdot T$ – это геохора, что включает геомеры $T \rightarrow T_b$ разных видов $b \in B$, встречающихся на местности.

В дифференциальной геометрии расслоение пространства $X = \{X_i\}$ координат X_i осуществляется на каждой точке $x_0 = \{x_{0i}\} \in M \in X$ гладкого многообразия (поверхности) M как базы расслоения B в виде касательных плоскостей (слоев). Например, картографическое расслоение земной поверхности M и отображение ее на плоской карте $TX_b \rightarrow Y_j$ в окрестности $U_b \subset M$ разных пунктов $b(x_0)$ в виде атласа карт $Y = \{Y_j\}$, $Y = M \cdot Y_0$, где Y_0 – образец карты специального тематического содержания, на основании которой создаются все остальные карты Y_j и используются стандартные легенды, что позволяет однообразно воспроизводить и сравнивать карты различных территорий в соответствующем атласе. Обычно это ландшафтные карты или карты административного деления с фиксированной сеткой границ контуров – слоев территориального расслоения. Картографические слои различаются базами расслоения по географическому положению, тематическому содержанию, типологической принадлежности выделов и по многим другим базовым критериям.

В дифференциальной геометрии внутренняя, эндогенная *связность* $F_j(x)$ реализуется в границах слоя Y_j в виде векторов, касательных к точкам многообразия $M = F(x)$ (рис. 1). Внешняя связность возникает при *переносе касательных слоев* вдоль линии пути на поверхности многообразия $M = F(x)$. Такая связность сопоставляет геометрические образы Y_j (слои), относящиеся к различным точкам $x_{0j} = \{x_{0ji}\} \in M$ пространства X , а именно характеризует преобразование касательных пространств $Y_j \rightarrow Y_k$ от точки x_{0j} к точке x_{0k} . Например, аффинная связность определяется отображением касательных плоскостей, сравнением их по аффинным свойствам переноса, поворота и растяжения, в частности, при проектировании карт. Точка касания лежит как на поверхности многообразия M , так и в плоскости слоя, тем самым определяя специфику соответствующего слоя его положением на M . Сопоставление слоев обосновывается наличием в каждом слое образа инвариантного начала (типового слоя).

Так, межфациальное различие и сходство выражается через подобие функций внутренней связности геокомплексов, например, их средоформирующей роли в горных ландшафтах, локально выполняющих охранную, защитную, водорегулирующую, стокоформирующую и другие функции, что

отражают причинно-следственные связи и особенности реакции на влияние факторов и условий. Типовым слоем (эталонном) функционирования являются коренные геосистемы, выложенные участки которых встречаются на плакорах, террасах и иных

равнинных территориях. Формально получается так, что одни и те уравнения $f(y)$ сквозным образом описывают различные зависимости, аффинно-эквивалентные по масштабу проявления и местоположению (см. рис. 1).

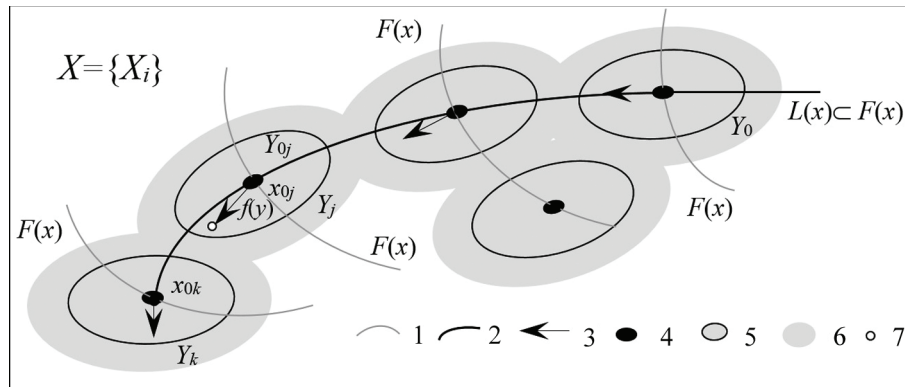


Рис. 1. Расслоение и внешняя связность при сравнении касательных слоев Y_j (геомеров) вдоль линии пути-маршрута $L(x)$ на поверхности многообразия $M = F(x)$: 1 – поверхность многообразия связей $M = F(x)$ (геосистемной функции) в пространстве координат $X = \{X_i\}$; 2 – линия пути $L(x)$ на $F(x)$; 3 – векторы-румбы a направления внутренней связности геосистемных признаков $x \in X$ в слое Y_j ; 4 – центр слоя Y_j (точки касания многообразия $F(x)$ с координатами $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$ ($j = 0, 1, \dots, k$); 5 – пространство ядра Y_{0j} касательного слоя Y_j с внешней границей; 6 – экстерриториальное влияние касательного слоя Y_j ; 7 – текущая связность геосистемы с интегральной характеристикой $f(y) = F(x) - F(x_{0j})$

Fig. 1. Stratification and external connectivity (cohesion) when comparing tangent layers (fibers) Y_j (geomers) along a path-route line $L(x)$ on the surface of a manifold $M = F(x)$: 1 – the surface of link manifold $M = F(x)$ (geosystem function) in the coordinate space $X = \{X_i\}$; 2 – the path line $L(x)$ on $F(x)$; 3 – the rhumb vectors a of the direction of internal cohesion of geosystem features $x \in X$ in layer Y_j ; 4 – the center of Y_j layer (points of contact of the $F(x)$ manifold) with coordinates $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$ ($j = 0, 1, \dots, k$); 5 – the core space Y_{0j} of the tangent layer Y_j with an external boundary; 6 – the exterritorial influence of the tangent layer Y_j ; 7 – the current cohesion in the geosystem with an integral characteristic $f(y) = F(x) - F(x_{0j})$

Сравнительно-географическая *связанность* основана на пограничном сцеплении разных состояний (слоев) геосистем различных местоположений. Связанность напоминает поезд – железнодорожный состав из нескольких сцепленных вагонов, или навигатор, указывающий порядок действий, управляя движением от места к месту, или процедуру логического вывода знаний, или траекторию решения дифференциального уравнения с начальным условием (состоянием) Y_0 . Слабая связанность (зависимость, зацепленность) предполагает высокое сходство слоев через аффинную связность (тождество противоположностей) $Y_j \leftrightarrow Y_k$ (см. рис. 1).

Такие закономерности объясняются средствами математического пространственного анализа. Наблюдаемая геосистемная зависимость $F(x)$ является функцией многих переменных $x = \{x_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) многомерного пространства $X = \{X_i\}$ координат X_i , где значение $x_i \in X_i$. Пространство X может быть представлено параметрами физического четырехмерного пространства-времени объектов на территории или признакового пространства измеряемых показателей объектов, географически координиру-

ванных. Неизвестная (выпуклая и замкнутая) функция $F(x)$ описывается с помощью касательного преобразования Лежандра $F(x) \otimes F^*(a)$ [Иоффе, Тихомиров, 1968]

$$F(x) = a \cdot x + F^*(a) = \sum_{i=1}^n a_i x_i + F^*(a), \quad (1)$$

$$a_i = \frac{\partial F(x)}{\partial x_i}, \quad x_i = -\frac{\partial F^*(a)}{\partial a_i},$$

где $x = \{x_i\}$, $a = \{a_i\}$ – два независимых набора (вектора) переменных; a_i – коэффициент чувствительности изменения функции $F(x)$ при единичном изменении аргумента x_i . Если функции $F_1(x)$ и $F_2(x)$ описывают измеренные в поле состояния разных ландшафтных компонентов $x = \{x_i\}$, то связанность этих состояний оценивается по модулю значения определителя матрицы Якоби, состоящего из коэффициентов $a = \{a_i\}$ [Истомина, Черкашин, 2013; Черкашин, Распутин, 2022].

В координатах местоположения переменная a_i называется компонентом градиента по фактору x_i , из которых складывается вектор a – градиент функции $F(x)$:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \nabla F(x) = \text{grad } F(x) = \\ &= a_1 \mathbf{i}_1 + a_2 \mathbf{i}_2 + a_3 \mathbf{i}_3 + \dots + a_n \mathbf{i}_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(x)}{\partial x_i} \mathbf{i}_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mathbf{i}_i$ – единичные векторы (орты) векторного пространства. Векторы $\mathbf{a}(x)$ определены в каждой точке x и каждом слое Y_j географического пространства X (см. рис. 1), формируя градиентное географическое поле, организующее возможные направления и интенсивности естественных процессов, например, поверхностный сток по градиенту высоты рельефа.

Двойственная функция $F^*(a)$ в соотношениях (1) – это нижняя грань величины $F(x) - a \cdot x$, показывающая насколько реальное значение $F(x)$ отличается от значения касательной плоскости $a \cdot x$, поэтому, с одной стороны, минимум функции $F^*(a)$ указывает на лучшие условия функционирования, а с другой – индексирует слой среди остальных слоев, позволяет их сравнивать по оптимальности. Выражение (1) при постоянном $F^*(a)$ называется аффинной функцией $F(x)$, аффинное преобразование (связность) которой переводит одну такую функцию в другую.

Г. Хакен [2003] ввел представление о параметрах порядка системы – небольшом числе независимых переменных, определяющих наблюдаемое разнообразие состояний функциональных переменных системы. В общем случае порядок для каждого геосистемного показателя задается соответствующей геосистемной функцией $F(x)$ и производными от нее характеристиками по слоям, соответствующим ареалам геоморфов ландшафта с индивидуальным природным режимом. Градиентные поля $\mathbf{a}$ (2) скалярных (потенциальных) полей $F(x)$ эмпирических значений структурообразующих параметров геопространства являются мерами параметров порядка, порождающих географические структуры (паттерны) ландшафта [Варшанина и др., 2013]. Румб градиента $\mathbf{a}$ указывает на направление локального движения геосистемных элементов, а его величина – фиксирует скорость и знак вертикальных и горизонтальных изменений состояний в условиях местной географической среды (см. рис. 1).

Функция (1) позволяет вычислять интегральную характеристику ландшафта по частным показателям $x = \{x_j\}$, что обеспечивает охват всего разнообразия территориальных межкомпонентных взаимодействий на соответствующем уровне организации (в слое). Эта функция включает вектор параметров порядка $\mathbf{a}$ и радиус-вектор $\mathbf{x}$ значений компонентов геосистем $F(x) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x} + F^*(a)$ при входных значениях $x_0 = \{x_{0i}\}$ и определенном внутреннем воздействии $F^*(a)$. В качестве точки x_0 справедливо принять точку касания $x_0 = \{x_{0i}\}$ j -го слоя на поверхности многообразия со значением $F(x_0) = F_0$. В этом случае

$$F_0 = \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_0 + F^*(a), F^*(a) = F_0 - \mathbf{a} \cdot \mathbf{x}_0, \quad (3)$$

т.е. $F^*(a)$ должно линейно определяться значениями чувствительности $a = \{a_i\}$, что может служить критерием принадлежности $F(x)$ к зависимости (1). Вычитая (3) из (1), получаем

$$F(x) - F_0 = \mathbf{a} \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0), \text{ или } f(y) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}, \quad (4)$$

где $f(y) = F(x) - F_0$ – относительное значение функции $F(x)$; $y = x - x_0$ – смещенные значения аргументов $x = \{x_i\}$. Скалярное произведение $f(y) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}$ – универсальное уравнение, не зависящее от специфических параметров x_0 и F_0 слоя, определяется параметрами порядка (компонентами a_i вектора $\mathbf{a}$) и величиной компонентов $y = \{y_i\}$ радиуса-вектора относительных координат y с центром в точке x_0 (см. рис. 1). Наличие и выделение универсальной функции $f(y)$ как раз и становится основанием для послойного внешнего, экзогенного сравнения (связности) и суждения о возможности единого ландшафтного поля Земли [Гомология..., 2009; Истомина, Черкашин, 2013].

Допускается обратное преобразование $F^*(a) \rightarrow F(x)$, т.е. если известна внутренняя структура чувствительности, задаваемая параметрами порядка $F^*(a)$, то имеется шанс восстановить реальную картину полей и их связи на изображениях $F(x)$, а также типизировать участки связности по характеру взаимодействия $F^*(a)$. Таким образом, функция $F^*(a)$ отражает внутреннюю, генетическую структуру геосистемы – *генотип ландшафта*, его *геоном*. Изменение геонома $F^*(a)$ в пространстве параметров порядка a в итоге соответствует эволюции (генезису) ландшафта $F^*(a) \rightarrow F(x)$, что описывается неизвестной функцией или дается графическим изображением $F(x)$.

Функция $f(y)$ согласно соотношениям (1) задается дифференциальным уравнением Эйлера

$$f(y) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial y_i} y_i, \quad a_i = \frac{\partial f}{\partial y_i}, \quad (5)$$

что с использованием оператора набла ∇ (см. формулу (2)) кратко записывается уравнением положительной обратной связи $f(y) = \nabla f(y)$, подчеркивающей самоорганизацию геосистемы – формирование ее на своей собственной основе. Уравнение (5) удовлетворяет функциям $f(y)$ различных финслеровых метрик типа евклидова расстояния между пространственными единицами [Morozov et al., 2023], т.е. от точки x до точки x_0 , что позволяет использовать $f(y)$ в качестве интегрального показателя связности геосистемы.

Каждому типу геосистемы свойствен свой режим функционирования $\{f(y)\}$ – множества причин и порядков изменчивости элементарных геосистем. Полифункциональное преобразование $y \rightarrow f(y)$ можно

трактовать как замену координат, например, отражение свойств компонентов геосистем y в яркости разных каналов дистанционной съемки и, наоборот, зависимости характеристик полевых описаний $f(y)$ от мультиспектральной дистанционной информации $y = \{y_i\}$. Такая зависимость строго реализуется по теореме Бине–Коши для определителей чувствительности преобразований индикаторов y в индикаты их связи $f(y)$ – через последовательный перенос геоинформации одного слоя в другой, что можно использовать для идентификации по космическим снимкам связности натуральных компонентов наблюдаемых геосистем [Гомология..., 2009, с. 134–135].

Исследование пространственного распределения полевых характеристик позволяет выделить на территории однородные участки по каждой величине $f(y)$, когда в окрестности каждой точки x_0 значение $f(y)$ относительно постоянно $f(y) = f_0$. Примерно такое представление о постоянстве компонентных признаков лежит в основе понимания гомогенных природных ареалов – геомеров разной размерности [Сочава, 1978]. В таком случае появляется возможность выразить одну независимую величину через другие:

$$y_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} y_i = - \sum_{i=1}^n \frac{\partial y_j}{\partial y_i} y_i, \\ a_{ij} = - \frac{\partial y_j}{\partial y_i} = \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} / \frac{\partial f(y)}{\partial y_j} = a_i / a_j, i \neq j. \quad (6)$$

Здесь $a_{ij} = a_i / a_j$ – коэффициент замещения одной переменной y_i на другую y_j при сохранении неизменной оценочной функции $f(y) = f_0$, что подразумевается для гомогенных геосистем. Для пары переменных будет $y_j = a_{ij} y_i$, например, $y_2 = a_{12} y_1$. В исходных переменных x_1 и x_2 тогда получается

$$x_2 - x_{02} = a(x_1 - x_{01}), \text{ или} \\ x_2 = ax_1 - ax_{01} + x_{02} = ax_1 + b, b = -ax_{01} + x_{02}. \quad (7)$$

Важно, что внутренняя связность независимых аргументов вида (6) и (7) справедлива для всех компонентных характеристик геосистем $f(y)$ при принятом предположении их постоянства $f(y) = f_0$ в границах слоев – ареалов геомеров. Это позволяет по парным и множественным связям (6) и (7) показателей разных каналов дистанционной съемки выделять границы этих ареалов и локально характеризовать особенности их параметров порядка a и оптимальности функционирования b . Для этого проводится локальный регрессионный анализ данных согласно формуле (7) $x_2 = ax_1 + b$ с последующим выделением однородной области корреляции коэффициентов $b = -ax_{01} + x_{02}$ с оценкой локальных характеристик ареала x_{01} и x_{02} (для случая парного

сравнения). По последней формуле получается, чем выше параметр порядка a , тем оптимальней природный режим функционирования. Переход величины a в отрицательную область ($a < 0$) дает прирост b , что указывает на проблемные ситуации (серийные и пограничные состояния).

В итоге на основе математических построений появляется возможность на растровом снимке попиксельно статистически обработать и типизировать участки территории по грациям однородности и связности и отобразить результаты на геоизображениях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве объекта исследования выбран участок $1,7 \times 2,6$ км² территории Тункинской межгорной котловины, включающий южный макросклон хр. Тункинские гольцы Восточного Саяна северней пос. Аршан, где расположены стационар Института географии имени В.Б. Сочавы СО РАН и учебно-научная база географического факультета Иркутского государственного университета. Территория характеризуется большим разнообразием ландшафтов от гольцовых и горнотаежных до подгорных геомов с проявлениями опасных экзогенных процессов и антропогенного влияния. В область исследования попадают литоморфные гольцовые геомы и подгольцовые кедрово- и лиственнично-редколесные, горнотаежные сосново-лиственничные леса с кедром, а также подгорные лиственнично-кедровые и сосновые леса геомеров уровня геомов и классов фаций [Истомина, 2012]. Выбор объекта определен его доступностью, хорошей инструментальной и картографической изученностью, наличием большого объема натуральных данных и данных ДЗЗ для сравнительно-географического анализа.

Использовались космические снимки программы Copernicus Sentinel-2 (20.09.2021, разрешение 10 м) разных спектральных каналов. Для сравнительного анализа привлекались те из них, которые в целом на изображении наименее коррелированы, т. е. демонстрируют специфическую информацию. Для работы выделены каналы В2 (синий) и В3 (зеленый), преимущественно отражающие характеристики растительного покрова. При этом под значениями x яркости пикселей растровых снимков обоснованно понимаются агрегированные показатели – функции разных биотических свойств, комплексно индицирующих влияние всех компонентов геосистем [Гомология..., 2009; Истомина, Черкашин, 2013].

Для обработки пространственной информации предлагаемым методом необходимо, чтобы данные, как в случае временных серий наблюдений,

формировали непрерывный ряд, для чего значения яркости пикселей снимались с растрового снимка каждого канала построчно сверху вниз по схеме бустрофедона (шага быка при вспашке поля), когда первая строка считывается слева направо, вторая – справа налево и т. д. По сути, речь идет о неразрывном сканировании растрового снимка. Таким образом на плоском изображении формируется линейный порядок (ЛП) в виде функции $F(x)$ связи показателей яркости, для которой выявляется локальная внутренняя связность однородных ареалов и межареальная переходная связанность. Результаты обработки обратно свертываются в плоское геоизображение, когда соседние в разных линиях значения пикселей находятся рядом, как и на исходном изображении.

Пространственная серия ЛП формировалась на основе атрибутивной базы данных ГИС цифровых снимков территории. Для статистической обработки использовалась программа для работы с электронными таблицами Microsoft Excel, удобная для научного анализа информации, хотя для массового использования метода необходимо специальное программное обеспечение.

Исследовалась структура линейной связности $x_2 = ax_1 + b$ значений В2(x_2) и В3(x_1) в рядах ЛП

методом скользящей регрессии по пяти точкам с определением коэффициентов a и b и их зависимости $b(a) = -ax_{01} + x_{02}$, где (x_{01}, x_{02}) соответствуют координатам центра пучка функционально однородных данных (x_2, x_1) . Однородность изображений участков тестировалась по линейности связности параметров порядка $b(a)$ (рис. 2А). Зависимость $b(a)$ – эмпирический аналог функции $b(a) = F^*(a)$ – генетической основы (геонома) ландшафтной функции $F(x) = x_2(x_1)$, представленной данными геоизображения в ЛП. Для горно-таежных геосистем в верховьях р. Кынгарги зависимость была $b(a) = -1542a + 648$ с индикаторами типа геомера $x_{01} = 1542$, $x_{02} = 648$ ($R = -0,96$). На всей территории проявился многолучевой пучок линейных связей $b(a)$ (см. рис. 2Б), различающихся положением центра пучка (слоя) с координатами (x_{01}, x_{02}) . Отдельная ветвь (луч) функции $F^*(a)$ соответствует разным геонам трех групп геомов: гольцовые, горнотаежные и подгорные (см. рис. 2Б). Геономный луч содержит географическую информацию, необходимую для построения и поддержания организации геосистемы определенного типа. В такой схеме генезис геосистем рассматривается как поворот лучей, т. е. переход от одних классов фаций к другим.

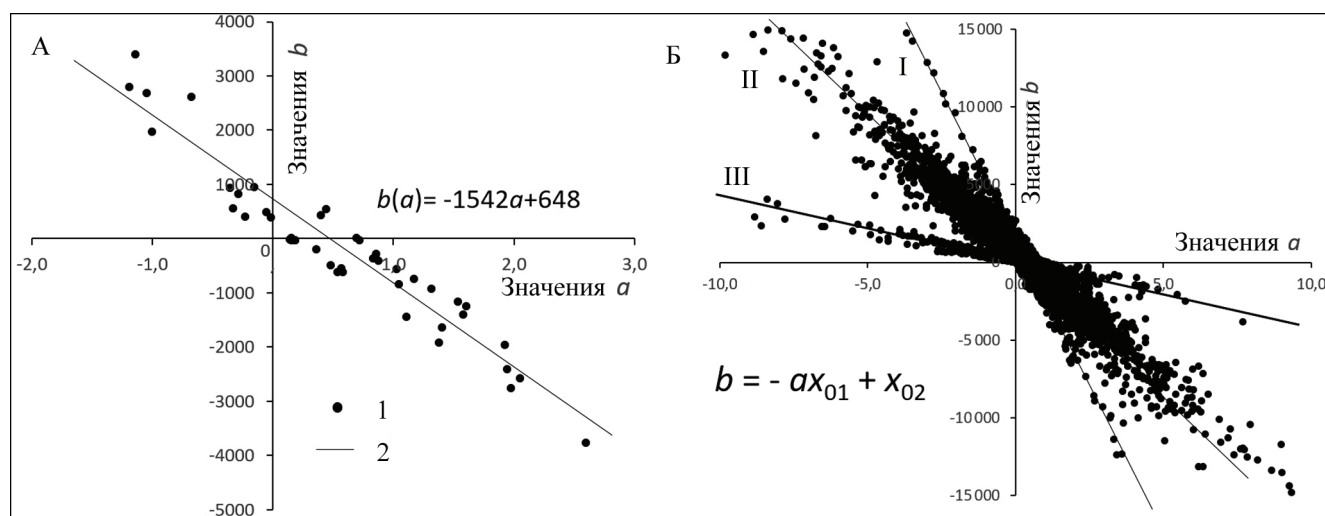


Рис. 2. Взаимодействие параметров порядка $b(a)$ для одного геомера (А) и всей ландшафтной территории (Б):

1 – результаты расчета по исходным данным; 2 – линейные зависимости $b(a) = -ax_{01} + x_{02}$. Группы геомов: I – гольцовые; II – горнотаежные; III – подгорные

Fig. 2. Interaction of parameters of the $b(a)$ order for one geomer (A) and the entire landscape area (B).

Symbols: 1 – calculation results based on initial data; 2 – linear dependencies $b(a) = -ax_{01} + x_{02}$. Groups of geomorphs: I – alpine mountain (goletzes); II – mountain taiga; III – submountain

Координаты центров пучков (x_{01}, x_{02}) связаны формулой $x_{02}(x_{01}) = a_0 x_{01} + b_0$ с коэффициентами $a_0 = 0,35$ и $b_0 = -268,7$ ($R = 0,98$). Схема эмпирической функции $F^*(a) = b(a)$ представлена на рис. 3 в виде директри-

сы $x_{02}(x_{01})$ связности центров (x_{01}, x_{02}) пучков локальных зависимостей $F(x) = x_2(x_1) = ax_1 + b$ разной ориентации a (параметров порядка). Каждый пучок соответствует слою расслоения функции $F(x)$. Схе-

ма дает возможность продемонстрировать, как выглядит ландшафтная территория $F(x)$ в двойственном генетическом пространстве $F^*(a)$ и позволяет типизировать геосистемы по положению центра пучка связи, а также представить пространственную трансформацию ареалов типов по высотным градиентам и во времени, например, в виде пространственного и эволюционного перехода группы геомов в географическом цикле: I (гольцовые) $\rightarrow$ II (горнотаежные) $\rightarrow$ III (подгорные) (см. рис. 2Б и 3).

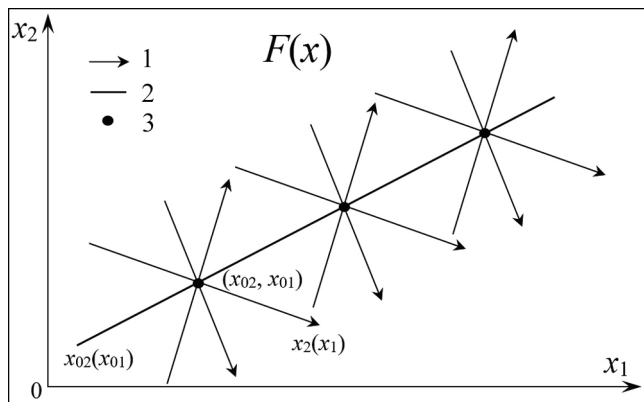


Рис. 3. Схема-модель послойного представления геосистемной функции – многообразия $F(x) = x_2(x_1)$ в пучках векторов линейной связности $x_2(x_1) = ax_1 + b$ (1), упорядоченных директрисой связности $x_{02}(x_{01}) = a_0x_{01} + b_0$ (2) по координатам центров (x_{02}, x_{01}) пучков (3)

Fig. 3. Scheme-model of fiber bundle representation of a geosystem function – manifold $F(x) = x_2(x_1)$ in sheaves of linear connectivity vectors $x_2(x_1) = ax_1 + b$ (1), ordered by the connective directrix $x_{02}(x_{01}) = a_0x_{01} + b_0$ (2) according to the coordinates of the sheaf centers (x_{02}, x_{01}) (3)

Внутри пучка зависимость $x_2 = ax_1 + b$ при известной связи коэффициентов $b = -ax_{01} + x_{02}$ приводится к виду $y_2 = ay_1$ в относительных переменных $y_2 = x_2 - x_{02}$, $y_1 = x_1 - x_{01}$, где a характеризует направление связности (параметр порядка), что изменяет $y_2 = \gamma ay_1$ от места a к месту $a' = \gamma a$ формально умножением на коэффициент ротации (кручения) $g = a'/a$. В пучке связей $y_2 = ay_1$ эта зависимость вращается, как стрелка компаса или флюгер, указывая на разные векторы a направления связности переменных x_2 и x_1 (см. рис. 3). Эта связность является однотипной для всех пучков (слоев связи) и варьирует кручением $y_2 = \gamma ay_1$ внутри слоя и трансформируется при переходе из слоя в слой при изменении положения центра пучка $x_{02}(x_{01})$. С помощью этих аффинных преобразований переноса центра и поворота линий обеспечивается внешне- и внутрифункциональная связность геосистем. Величиной $b = -ax_{01} + x_{02}$ все изменчивые параметры a , x_{01} ,

x_{02} объединяются в одном выражении и схеме (см. рис. 3), что позволяет сравнивать данные ЛП: как уже отмечено в комментарии к формуле (1), чем меньше $F^*(a) = b(a)$, тем совершенней организация геосистемы.

Геоизображение (рис. 4А) в переменных ЛП обрабатывалось по методу скользящей регрессии (с шагом 3) зависимости значений яркости пикселей двух каналов снимка $B2(x_2)$ от $B3(x_1)$. Результаты расчетов визуализировались по положению x в ЛП(x) и в свернутом виде плоского изображения.

Коэффициент корреляции R (см. рис. 4Б) указывает на степень и качество локальной связности $-1 \leq R \leq 1$ переменных $x_2(x_1)$. Сильная линейная зависимость соответствует интервалу $-0,6 \leq R \leq 0,6$, что на геоизображении прослеживается в виде черных точек границ геомов. Отрицательная корреляция $R \leq -0,6$ подчеркивает эти границы и выделяет участки межсклоновых понижений и речных долин. Положительные значения $R \geq 0,6$ определяют общий фон функциональной связности $x_2(x_1) = ax_1 + b$ геокомплекса, представленного одним пучком $y_2 = x_2 - x_{02} = a(x_1 - x_{01})$ однородного по положению центра (x_{02}, x_{01}) в признаковом пространстве (x_2, x_1) , но изменчивого по направлению влияния a (см. рис. 3).

В пространственных рядах ЛП(ξ) значения $a(\xi)$ имеют линейную тенденцию возрастания и снижения, что обусловлено особенностью формирования ЛП(ξ) по схеме бустрофедона, благодаря чему зависимость коэффициента ротации $\gamma(\xi)$ имеет циклический вид и формирует ячейки однородности связи вокруг координат центров (x_{02}, x_{01}) и линейные области $\gamma(\xi) \approx 1$ постоянства значения a размером примерно 100 м. На геоизображении (см. рис. 4В) фон определяется слабыми положительными или отрицательными значениями параметров порядка a в зависимости $x_2(x_1)$. Высокие значения $a \geq 0,6$ относятся к геосистемам высокогорья, северных склонов и речных долин. Высокие отрицательные значения $a \leq -0,36$, как правило, примыкают к положительным $a \geq 0,6$ в переходных зонах. Кроме того, оба варианта высокой связности на поле фоновых значений a выделяют границы контуров участков геомов класса фаций размером до 200 м. Таким образом, параметры порядка a подчеркивают границы геомов, а также оконтуривают участки вокруг водоразделов и тальвегов.

Геоизображение (см. рис. 4Г) геонимической величины $b(\xi)$ в силу локальной отрицательной зависимости коэффициентов $b = -ax_{01} + x_{02}$ инвертировано повторяет рис. 4В, но учитывает также координаты (x_{02}, x_{01}) типовых центров. Качественно лучшими являются местоположения с отрицательными значениями $b(\xi)$, занимающие большую часть

территории горного ландшафта. Максимальные положительные значения $b(\xi)$ относятся к долинам рек и северным склонам водосборов. Экстремальные значения $b(\xi)$ выделяют особые геоморфологические структуры – линеаменты и концентры, пространственно повторяющие структуру связности признаков (см. рис. 3). Диагональные территориальные структуры (линеаменты, разломы) проявляются

на уровне $b(\xi) < 287$. Концентры просматриваются как ядра геомеров [Истомина, 2012] и оконтуриваются пикселями со значениями $b(\xi) > 378$. Упорядоченность элементов геопространства подтверждается различными показателями (см. рис. 4Б–Г), что могут быть использованы в качестве информационной основы создания корреляционных карт [Сочава, 1978].

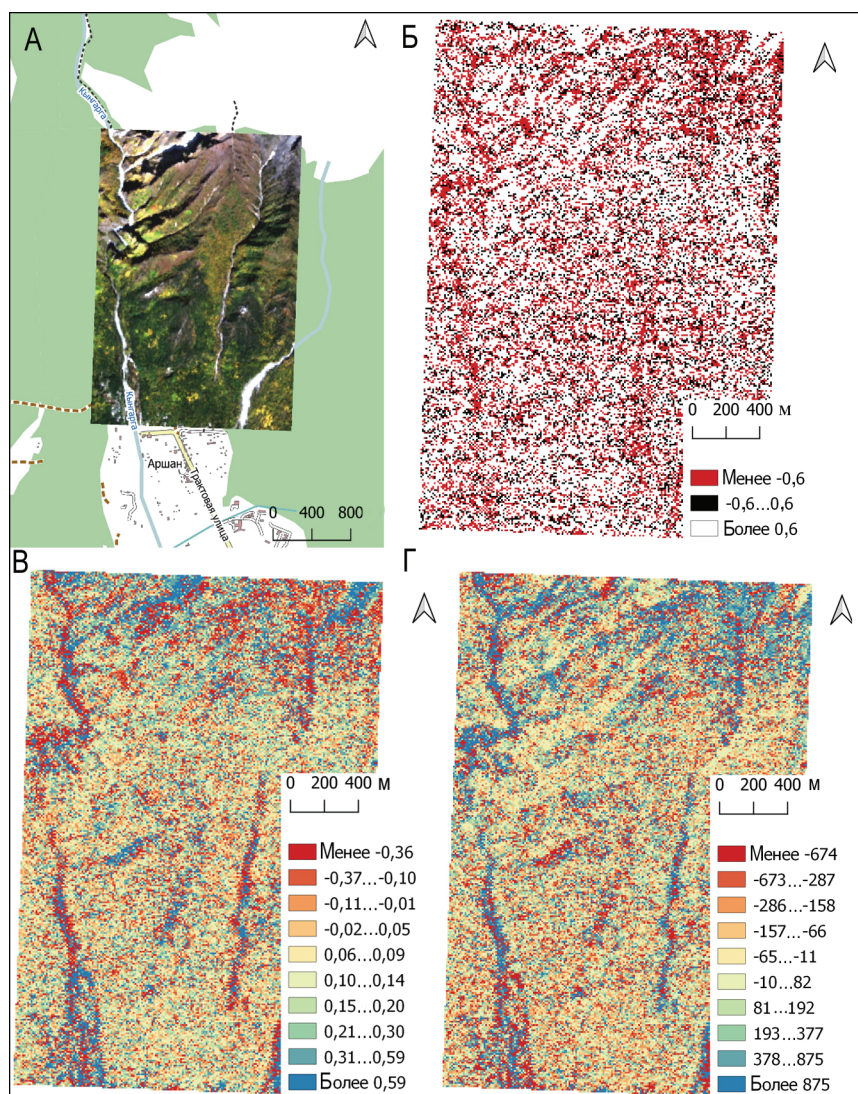


Рис. 4. Порядок статистического анализа геоизображения: А – фрагмент космического растрового снимка Sentinel-2 (сочетание каналов B4, B3, B2) окрестностей пос. Аршан на фоне топографической карты; Б – коэффициент корреляции R значений яркости пикселей снимка в каналах $B3(x_1)$ и $B2(x_1)$; В – значения коэффициента a ; Г – значения коэффициента b зависимости $x_2 = ax_1 + b$

Fig. 4. The order of statistical analysis of a geo-image: А – a fragment of the Sentinel-2 space raster image (combination of B4, B3, B2 channels) of the vicinity of the Arshan village against the topographic map background; Б – the correlation coefficient R of the brightness values of pixels on the image in $B3(x_1)$ and $B2(x_1)$ channels; В – the values of a coefficient; Г – the values of b coefficient in the dependence $x_2 = ax_1 + b$

Тонкий количественный анализ растрового изображения на основе преобразования Лежандра $F(x) \rightarrow F^*(a)$ позволяет выявить и картографировать организацию пространства по многоканаль-

ному снимку в виде системы линейных функций $b(a) = F^*(a)$. Обработка данных подтверждает существования этих функций (геономов) ландшафта, по которым обратным статистическим преобразова-

ем $F^*(a) \rightarrow F(x)$ геоизображение восстанавливается с корреляцией исходных и восстановленных значений $F(x)$ на уровне $R = 0,88$.

ВЫВОДЫ

Ландшафтные закономерности проявляются в виде внутренней и внешней функциональной связности компонентов и геокомплексов и внешней потоковой инфраструктурной связанности разных геосистем. Для фиксации разного рода зависимостей используются данные натурных и дистанционных исследований, проводится их многомерный статистический анализ в территориальном и признаковом пространствах.

Вид функций зависимостей неизвестен, поэтому для обоснования ее локального представления используется математическое касательное преобразование Лежандра, статистически реализуемое средствами скользящего регрессионного анализа. Для обеспечения неразрывности обработки геоизображения, оно разворачивается по схеме бустрофедона в линейные последовательности пиксельных данных (тексты), а результаты расчетов связности свертываются в производные изображения типа корреляционных растровых картограмм.

Принимается работающая гипотеза постоянства интегральных показателей связи компонентных признаков в границах гомогенных природных ареалов (геомеров), что позволяет исследовать структуру связности ландшафтного пространства по корреляционной зависимости яркостных характе-

ристик растровых космических снимков. Изучена связность значений яркости двух каналов В2 и В3 снимка южного макросклона хр. Тункинские гольцы (Восточный Саян).

Выявленная по данным многолучевая функция Лежандра отображает генетическую основу исходного геоизображения, которое может быть восстановлено по этой функции с 88%-ной точностью. Каждый луч выделяет геонм соответствующего геомера, по которому появляется возможность сравнивать и типизировать геосистемы, а также прослеживать их пространственную и временную изменчивость.

Коэффициенты локальных линейных взаимозависимостей значений яркости снимков разных каналов рассматриваются в качестве параметров порядка, что указывают на величину, направленность и качество связей в ландшафтной системе-комплексе. На производных геоизображениях высокие значения этих параметров относятся к геосистемам высокогорья, северных склонов и речных долин, а также они выделяют точечные границы ядер геомеров классов фаций и линеаменты территориальной структуры.

Дальнейшие исследования предполагают реализацию многомерного анализа связности дистанционных данных, интерпретацию результатов расчетов на местности с привязкой к типам геомеров и создание по этим результатам картографических произведений разного тематического содержания для разработки моделей пространственно-временной изменчивости геосистем.

Благодарность. Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ АААА-А21-121012190056-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдеев В.А., Яблонский Л.И. Обеспечение геоинформационной связности территории на основе развития инфраструктуры пространственных данных // Вестник СГУГиТ. 2022. Т. 27. № 3. С. 30–39.
- Варшанина Т.П., Плисенко О.А., Зорин В.П. и др. ГИСНИ самоорганизации геосистем // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». 2013. Вып. 19. Т. 1. С. 94–99.
- Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2005. 520 с.
- Гомология и гомотопия географических систем / под ред. А.К. Черкашина, Е.А. Истоминой. Новосибирск: Гео, 2009. 351 с.
- Инькова О., Манзотти Э. Связность текста. Мереологические логико-семантические отношения. М.: Языки славянской культуры, 2019. 376 с.
- Иоффе А.Д., Тихомиров В.М. Двойственность выпуклых функций и экстремальные задачи // УМН. 1968. Т. 23. Вып. 6. С. 51–116.
- Истомина Е.А. Геоинформационное картографирование ландшафтов Тункинской котловины на основе метода факторально-динамической классификации // Геодезия и картография. 2012. № 4. С. 32–39.
- Истомина Е.А., Черкашин А.К. Математические модели географического комплекса и их применение для анализа космической информации // Известия РАН. Сер. географическая. 2005. № 2. С. 103–113.
- Истомина Е.А., Черкашин А.К. Выделение границ функционально однородных ареалов на космических снимках на основе вычисления определителя Якоби // География и природные ресурсы. 2013. № 1. С. 157–165.
- Козлов Д.Н., Пузаченко М.Ю., Федяева М.В. и др. Отображение пространственного варьирования свойств ландшафтного покрова на основе дистанционной информации и цифровой модели рельефа // Известия РАН. Сер. географическая. 2008. № 4. С. 112–124.
- Комиссарова Т.С., Скупинова Е.А., Титова О.В. Геоэкологический каркас территории как пространственная

- совокупность геосистем разного типа // Вестник ЛГУ им. А.С. Пушкина. 2013. Т. 3. № 1. С. 7–17.
- Макунина Г.С. Три составляющие системной организации ландшафта в концепциях Ф.И. Козловского, А.А. Крауклиса и В.Н. Солнцева // География и природные ресурсы. 2010. № 1. С. 18–23.
- Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов (проблемы методологии и теории). М.: Мысль, 1981. 239 с.
- Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.
- Хакен Г. Тайны природы. Синергетика: наука о взаимодействии. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2003. 320 с.
- Хорошев А.В. Полимасштабная организация географического ландшафта. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2016. 416 с.
- Хорошев А.В., Пузаченко Ю.Г., Дьяконов К.Н. Современное состояние ландшафтной экологии // Известия РАН. Сер. географическая. 2006. № 5. С. 12–21.
- Черкашин А.К. Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука, 2005. 280 с.
- Черкашин А.К. Метатеоретическое семиотическое моделирование в науке и технике // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2022. № 2(26). С. 5–23.
- Черкашин А.К., Распутина Е.А. Комплексная география как направление теоретических исследований и моделирования // Географический вестник. 2022. № 1(60). С. 6–22.
- Bittner T. Towards a Quantum Theory of Geographic Fields, 13th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2017), Leibniz International Proceedings in Informatics, Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik, Dagstuhl Publishing, 2017, Article no. 5, p. 5:1–5:14.
- Morozov A.S., Kontsevik G.I., Shmeleva I.A. et al. Assessing the transport connectivity of urban territories, based on intermodal transport accessibility, *Frontiers in Built Environment*, 2023, vol. 9, DOI: 10.3389/fbuil.2023.1148708.
- Remote Sensing and GIS for Ecologists: Using Open Source Software*, M. Wegmann, B. Leutner, S. Dech (eds.), Pelagic Publishing Ltd, 2016, 352 p.
- Yarham R. *How to Read the Landscape*, A Crash Course in Interpreting the Great Outdoors, Ivy Press, 2018, 256 p.

Поступила в редакцию 20.01.2024

После доработки 04.03.2024

Принята к публикации 26.06.2024

MATHEMATICAL AND STATISTICAL ANALYSIS OF GEO-IMAGES FOR STUDYING THE SPATIAL ORGANIZATION OF GEOSYSTEMS

A.K. Cherkashin¹, E.A. Rasputina²

^{1,2} V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Laboratory of Theoretical Geography

¹ Professor, Chief Scientific Researcher, D. Sc. in Geography; e-mail: akcherk@irnok.net

² Senior Scientific Researcher, Ph. D. in Geography; e-mail: elenarasputa@yandex.ru

An important line of landscape studies is the development of new methods for quantitative analysis of spatial information basing on the progressing theoretical basis, here the theory of complex geosystems, their models of linear ordering and cohesion of various parts of a territorial entity. The method is based on the procedures of tangent stratification (fiber bundle) of geosystem functions of the connection of geographical characteristics and their transformation, which makes it possible to identify the genetic basis (geonome) of landscape structure and landscape organization based on space geo-images. Raster geo-images are deployed in a linear sequence, and the linear cohesion of the brightness values of different channels is calculated using the rolling regression method. A geonom has been identified and raster mapping of regression coefficients as parameters of the order of mountain landscapes of the southern macro-slope of the Tunka goletzy in the Eastern Sayan Mountains has been carried out. The multipath geonomic function calculated from spatial data displays the hidden essence of the original geo-image, which can be restored with 88% accuracy using this function. Each path ray highlights a geonome of a corresponding geomere, according to which it becomes possible to compare and classify geosystems, as well as to trace their spatial and temporal variability. High values of the cohesion order parameters relate to the geosystems of highlands, northern slopes and river valleys; they also highlight the point boundaries of the geomere's cores and the lineaments of the territorial structure.

Keywords: models of complex geosystems, geosystem functions, tangent bundle, order parameters, processing of raster geo-images, Eastern Sayan

Acknowledgements. The study was carried out using the funds of the state task (state registration number of the topic AAAA21-121012190056-4).

REFERENCES

- Avdeev V.A., Yablonsky L.I. Obespechenie geoinformacionnoj svyaznosti territorii na osnove razvitiya infrastruktury prostranstvennykh dannyyh [Ensuring geographic information connectivity of the territory based on the development of spatial data infrastructure], *Vestnik SGUGiT*, 2022, vol. 27, no. 3, p. 30–39. (In Russian)
- Bittner T. Towards a quantum theory of geographic fields, *13th International conference on spatial information theory (COSIT 2017). Leibniz International Proceedings in Informatics. Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik*, Dagstuhl Publishing, 2017, Article no. 5, p. 5:1–5:14.
- Cherkashin A.K. Metateoreticheskoe semioticheskoe modelirovanie v nauke i tekhnike [Metatheoretical semiotic modeling in science and technology], *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii*, 2022, no. 2(26), p. 5–23. (In Russian)
- Cherkashin A.K. *Polisistemnoe modelirovanie* [Polysystem modeling], Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 280 p. (In Russian)
- Cherkashin A.K., Rasputina E.A. Kompleksnaya geografiya kak napravlenie teoreticheskikh issledovaniy i modelirovaniya [Integrated geography as a field of theoretical research and modeling], *Geograficheskij vestnik*, 2022, no. 1(60), p. 6–22, DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-6-22. (In Russian)
- Gomologiya i gomotopiya geograficheskikh sistem* [Homology and homotopy of geographical systems], A.K. Cherkashin, E.A. Istomina (eds.), Novosibirsk, Geo Publ., 2009, 351 p. (In Russian)
- Haken H. *Erfolgsgeheimnisse der Natur. Synergetik – Die Lehre vom Zusammenwirken*, DVA, 1981.
- In'kova O., Manzotti Je. *Svyaznost' teksta. Mereologicheskie logiko-semanticheskie otnosheniya* [The cohesion of text. Mereological logical-semantic relations], Moscow, Jazyki slavyanskoy kul'tury Publ., 2019, 376 p. (In Russian)
- Ioffe A.D., Tihomirov V.M. Dvoystvennost' vypuklykh funktsij i ekstremal'nye zadachi [The duality of convex functions and extreme problems], *Uspekhi matematicheskikh nauk*, 1968, vol. 23, iss. 6, p. 51–116. (In Russian)
- Istomina E.A. Geoinformatsionnoe kartografirovanie landshaftov Tunkinskoj kotloviny na osnove metoda faktoral'no-dinamicheskoy klassifikatsii [Geoinformation mapping of the Tunka basin landscapes based on the method of factorial-dynamic classification], *Geodezy and Cartography*, 2012, no. 4, p. 32–39. (In Russian)
- Istomina E.A., Cherkashin A.K. Identifying the boundaries of functionally homogeneous areas in space images from a calculation of the Jacobian determinant, *Geography and Natural Resources*, 2013, vol. 34, no. 1, p. 88–95.
- Istomina E.A., Cherkashin A.K. Matematicheskie modeli geograficheskogo kompleksa i ikh primeneniye dlya analiza kosmicheskoy informatsii [Mathematical models of a geographical complex and their application for the analysis of space information], *Izvestiya RAN, Ser. geogr.*, 2005, no. 2, p. 103–113. (In Russian)
- Khoroshev A.V. *Polimasshtabnaya organizatsiya geograficheskogo landshafta* [Multi-scale organization of a geographical landscape], Moscow, Tovarihshestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2016, 416 p. (In Russian)
- Khoroshev A.V., Puzachenko Yu.G., D'yakov K.N. Sovremennoe sostoyanie landshaftnoj ekologii [The current state of landscape ecology], *Izvestiya RAN, Ser. geogr.*, 2006, no. 5, p. 12–21. (In Russian)
- Komissarova T.S., Skupinova E.A., Titova O.V. Geoekologicheskij karkas territorii kak prostranstvennaya sovkupnost' geosistem raznogo tipa [The geoecological framework of the territory as a spatial set of geosystems of different types], *Vestnik LGU im. A.S. Pushkina*, 2013, vol. 3, no. 1, p. 7–17. (In Russian)
- Kozlov D.N., Puzachenko M.Yu., Fedyaeva M.V., Puzachenko Yu.G. Otobrazhenie prostranstvennogo var'irovaniya svoystv landshaftnogo pokrova na osnove distantsionnoj informatsii i tsifrovoy modeli rel'efa [Displaying spatial variation of landscape cover properties based on remote information and a digital relief model], *Izvestiya RAN, Ser. geogr.*, 2008, no. 4, p. 112–124. (In Russian)
- Makunina G.S. Tri sostavlyayushchie sistemnoj organizatsii landshafta v kontseptsiyakh F.I. Kozlovskogo, A.A. Krauklisa i V.N. Solntseva [Three components of the system organization of landscape in the concepts by F.I. Kozlovsky, A.A. Krauklis and V.N. Solntsev], *Geography and Natural Resources*, 2010, no. 1, p. 18–23. (In Russian)
- Morozov A.S., Kontsevik G.I., Shmeleva I.A. et al. Assessing the transport connectivity of urban territories, based on intermodal transport accessibility, *Frontiers in Built Environment*, 2023, vol. 9, 2023, DOI: 10.3389/fbuilt.2023.1148708.
- Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemakh* [Introduction to the doctrine of geosystems], Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, 318 p. (In Russian)
- Solntsev V.N. *Sistemnaya organizatsiya landshaftov (problemy metodologii i teorii)* [System organization of landscapes (problems of methodology and theory)], Moscow, Mysl' Publ., 1981, 239 p. (In Russian)
- Remote Sensing and GIS for Ecologists: Using Open Source Software*, M. Wegmann, B. Leutner, S. Dech (eds.), Pelagic Publishing Ltd, 2016, 352 p.
- Varshanina T.P., Plisenko O.A., Zorin V.P., Solodukhin A.A. GISNI samoorganizatsii geosistem [GISNI of self-organization of geosystems], *Materialy Mezhdunarodnoj konferentsii "InterKarto. InterGIS"*, 2013, iss. 19, vol. 1, p. 94–99. (In Russian)
- Volkova V.N., Denisov A.A. *Osnovy teorii sistem i sistemno-go analiza* [Fundamentals of systems theory and system analysis], St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2005, 520 p. (In Russian)
- Yarham R. *How to Read the Landscape: A Crash Course in Interpreting the Great Outdoors*, Ivy Press, 2018, 256 p.

Received 20.01.2024

Revised 04.03.2024

Accepted 26.06.2024