

УДК 911.2:51–7(571.53-55)

ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГЕОСИСТЕМ БАЙКАЛЬСКОЙ СИБИРИ

А. К. Черкашин*, А. А. Фролов**

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

**E-mail: akcherk@irmok.net*

***E-mail: f-v1984@mail.ru*

Теоретически и статистически исследована дискретная пространственно-временная изменчивость характеристик геосистем регионального уровня (геомов) территории Байкальской Сибири. Использовались понятия и уравнения единой квантовой теории, направленной на дробное описание процессов и явлений в терминах функционального состояния геомов в гильбертовом пространстве суперпозиции функций высотного распределения геосистем. Частотные распределения по грациям высоты определялись на основе совмещения электронной карты геомов и цифровой модели рельефа. Геомы различаются по модальным значениям высоты, соответствующим их наибольшей встречаемости — оптимальным условиям существования на территории. Распределения преобразуются в показатели интегрированной опасности, которые статистически пересчитываются в информационные функции сквозной квантовой теории. Коэффициенты изменчивости этих функций по высоте местоположения квантуются, различаются по геомам, что подтверждается результатами теоретического анализа. Построена карта квантовых уровней пространственно-временной изменчивости геомов Байкальской Сибири и схема пространственно-временных переходов между квантовыми уровнями (геомами). Обосновываются методы прогнозирования динамики и эволюции геосистем и предлагаются новые процедуры расчета квантовой изменчивости временного и пространственного положения геомов.

Ключевые слова: единая квантовая теория, функциональный анализ, пространственно-временная изменчивость, дискретные состояния геомов, цифровая модель рельефа, Байкальская Сибирь

DOI: 10.31857/S0869607124030044, EDN: LLSLRG

ВВЕДЕНИЕ

География призвана объяснять и обеспечивать возможность понимания особенностей самых сложных, сочетанных процессов и явлений, происходящих на Земле, что требует использования адекватных исследовательских инструментов, моделей и методов описания и прогнозирования изменений. Особенно это важно в современных условиях нарастания климатического и антропогенного влияния на природную, ландшафтную среду. Изменения в ландшафтах могут быть медленными или быстрыми, они носят качественный, необратимый, эволюционный характер, или напротив — обратимы и периодически повторяются. Все разнообразие изменений

в геосистемах объединяется в одно понятие «пространственно-временная изменчивость», которая рассматривается как сложное свойство географических систем.

Основной целью исследования эволюции структуры географических систем давно является решение проблемы, как характеристики разных мест меняются с течением времени в результате процессов региональной конвергенции и дивергенции, для чего разрабатываются соответствующие модели [33–34]. Структуризация географического пространства основана на его представлении в виде множества геоструктур различных типов с выделением нескольких осей измерений и их сопряжений: компонентных, пространственных, межкомпонентных связей, рубежей и границ и т. д. [2]. Этому способствует использование вычислительных средств (компьютеров), геоинформационных систем (ГИС) и аналитических методов сетевых моделей для решения реальных задач в широком спектре прикладных областей [35]. Пространственно-временные подходы представляют собой набор концепций, методов и процедур, направленных на представление и понимание эволюции природных и общественных явлений в пространстве через описание территориальных объектов, их атрибутов, их отношений и процессов изменения средствами моделирования и расчета пространственно-временных индикаторов [39]. В исследованиях учитывается роль межкомпонентных взаимодействий в ходе изменений, что требует целостного мышления и привлечения моделей нелинейной динамики, а ключевой темой становится изучение эволюционных тенденций как вероятностных процессов [40].

В настоящее время накоплен значительный опыт исследования, моделирования и прогнозирования текущей изменчивости геосистем. Предлагаются различные модели и методы изучения изменений ландшафтов. При этом используются разные комплексные показатели изменчивости, рассчитанные на основе временной серии данных ДЗЗ с применением ГИС-технологий [4, 11, 22, 42], статистических моделей связи свойств и характеристик ландшафтов [36], идей теории графов и теории случайных процессов [3, 41].

В модели опустынивания и восстановления Черных земель Прикаспия [4, 42] с помощью дифференциальных уравнений описывался процесс смены состояний участков территории – переход земель из одной стадии антропогенной деградации в последующую и обратно направленное восстановление. Преимуществом модели является описание в обобщенных показателях (площадь земель в разных состояниях) процесса опустынивания; факторное влияние учитывается через коэффициенты интенсивности процессов смены состояний. Модель получила развитие в дальнейших исследованиях [12, 16], где она используется для математического моделирования динамики и прогнозирования эволюции аридных ландшафтов.

В работах Э.Г. Коломыца [7–10] предлагается метод прогнозирования изменения ландшафтной структуры на фоне колебания климата. Метод основан на представлении об «экологических нишах» – кривых возможных состояний ландшафта в пространстве климатических показателей (факторов), – на результатах информационно-статистического анализа, оценках климатических изменений, применении ориентированных графов и вероятностных цепей Маркова. Такой набор средств реализует функционально-динамический и отчасти структурно-генетический подход к формированию прогноза.

Для оценки глобальной реакции растительности на изменение климата широко используются биоклиматические ординационные схемы – графические изображения области встречаемости растительных сообществ и иных компонентов геосис-

тем в координатах климатических факторов [6]. В частности, в исследовании [14] прогноз состояния лесного покрова Сибири основан на использовании ординационных моделей, отражающих изменение породного состава лесов в пространстве биоклиматических воздействий. На основе этих моделей появляется возможность прогнозировать изменения лесорастительного потенциала каждого участка территории при разных климатических сценариях. В статье [5] сделаны оценки возможных изменений ареалов зональных фитоценозов потенциальной растительности равнинных территорий России в связи с увеличением среднегодовой глобальной приземной температуры на 1°C. Экофизиологический подход к прогнозированию позволяет отразить смену разнообразия растительного покрова вдоль биоклиматических градиентов [37].

В рамках исследования временной изменчивости геосистем нами разрабатывались и реализовывались методы и алгоритмы прогнозного картографирования климатогенных трансформаций геосистем на разных иерархических уровнях: 1) картографирование изменений геомной структуры (региональный уровень) территории Предбайкалья при климатических колебаниях [18, 19]; 2) проведение геоинформационно-картографического анализа трансформаций геосистем ранга групп фаций (топологический уровень) с использованием модели клеточного автомата [20–21]. В первом случае основанием для прогноза послужили выявленные пространственно-временные и классификационные связи геомов, характерные высоты расположения каждого геомы и структуры размещения выделов геомов по высоте, а во втором — характер локального окружения (соседства) выделов фаций, отражающий особенности их взаимодействия, площадь и длина границ каждого исследуемого выдела, средняя высота над уровнем моря расположения каждого выдела и модальное значение распределения площади геосистем разных групп фаций в регионе по высоте местоположения. Исследование, моделирование и прогнозирование проводятся по градиентам высоты местоположения геосистем, когда высота рассматривается в качестве комплексного показателя состояния среды, что оправдано для горных территорий с выраженной высотной поясностью.

Каждый подход к моделированию и прогнозированию имеет свои особенности и специфическую сложность реализации при обработке данных, в связи с чем возникает необходимость в развитии объединяющей, целостной, системной методологии решения задач моделирования изменчивости в терминах единой квантовой теории.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

Выделены две формы проявления временной дискретной (со сменой инварианта, типа геосистемы) и непрерывной (без смены инварианта) изменчивости геосистем в зависимости от влияния природных и природно-антропогенных факторов. К непрерывной временной изменчивости относятся различные формы природной и антропогенной динамики геосистем, а к дискретной — качественная трансформация, эволюция геосистем [17]. Примером глубокой трансформации являются процессы и явления географического цикла, выражающиеся в последовательной смене ландшафтов под действием эндогенных и экзогенных сил, в тектоническом поднятии и эрозионном выравнивании рельефа.

С целью анализа дискретных форм пространственно-временной изменчивости используется квантово-географический подход, при котором дискретные свойства геосистем рассматриваются с позиции единой, сквозной квантовой (К) теории как раздела функционального математического анализа для количественного описания

дробности и целостности природных и общественных систем. Используются процедуры тривиальных и главных расслоений дифференциальной геометрии и функционального анализа виртуальных внутренних пространств геосистем (геомеров и геохор). Преимущество К-описания заключается в линейной простоте уравнений и формул, отражающих как типовые функции дискретно-квантовых состояний геосистем, так и суперпозицию этих состояний, реализуемую в наблюдаемых пространственных закономерностях в природе и обществе. Такой подход становится результатом восхождения от простого понимания географических объектов как систем непрерывной связи элементов к выделению независимых дискретных слоев самостоятельного функционирования (геомеров), их полисистемной эквивалентности в геохорах и внутрирайонной целостности. Для количественного анализа картографических данных применяются методы теории надежности, основанные на частотных распределениях площадей геомеров по высоте, на расчете показателей надежности и безопасности [26–27].

Для К-моделирования используется методология расслоения дискретных множеств и непрерывных пространств [31, 23–26], основанная на идеях дифференциальной геометрии. В публикациях обсуждается возможность использования К-теории для моделирования географических полей в терминах расслоения пространства для классификации и выделения границ географических районов [29–30] по схеме Б. З. Илиева [38] формулировки нерелятивистской квантовой механики, где векторные расслоенные пространства являются гильбертовыми. Ставится задача сквозным образом распространить эволюционные понятия и модели К-теории на явления различного рода и масштаба.

Касательное расслоение $\Omega = (X, \pi, M, F)$ многомерного пространства-времени $(t, x) \in X, x = \{x_j\}$ над многообразием $M(t, x)$, заданным гладкой поверхностью функции состояния геосистемы $F(t, x)$ в точках $x_0 = \{x_{0j}\}$ (рис. 1а) в начальный момент $t = 0$ – это отображение $\pi: X(t, x) \rightarrow M(0, x_0)$, обратное которому $\pi^{-1}: M(0, x_0) \rightarrow X(t, x)$ представляет пространство X в виде расслоенного тривиального пространства $M \times F$; F – типовой (абстрактный) слой, похожий $F \leftrightarrow F_j$ на все остальные j -е касательные слои-гиперплоскости F_j расслоения $F = \{F_j(t, x)\}$ (рис. 1б). Результат расслоения Ω напоминает атлас $F = \{F_j\}$ отображения окрестностей различных пунктов $x = x_{0j}$ поверхности $F(t, x)$ земной сферы на плоские карты $F_j(t, x)$ с общей легендой их содержания, определяющего тематическое сходство карт. Другой вариант расслоения $M \times F$ – дифференциация территории X на ареалы геосистем F_j разного типа $F = \{F_j\}$ (геомеры) согласно легенде M . Важно, что каждый слой F_j может рассматриваться как координата многомерного пространства $F = \{F_j\}$, в котором сложная система представляет собой вектор-сочетание разных координат, отражающий положение системы в этом пространстве, например, характеризует геохору F списком геомеров $F = \{F_j\}$ (рис. 1б) в ландшафте $X(t, x)$ с учетом их встречаемости p_j . Каждый касательный слой $F_j(t, x)$ параметризуется набором координат $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$ точки касания поверхности геосистемной связи $F(t, x_{0j})$ – дискретного многообразия $M(0, x_{0j})$ (рис. 1а).

Касательная плоскость (слой расслоения) $F_j(t, x)$ хорошо описывает функцию $F(t, x)$ в окрестности точки касания $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$ билинейным уравнением [25], в данном случае

$$F_j(t, x) = v_j t + a_j \cdot y_j + F_{0j}, a_j \cdot y_j = \sum_i a_{ij} y_i, \\ a_{ij} = \frac{\partial F_j(t, x)}{\partial x_i} = \frac{\partial f_j(t, y)}{\partial y_{ij}}, v_j = \frac{\partial F_j(t, x)}{\partial t}, \quad (1)$$

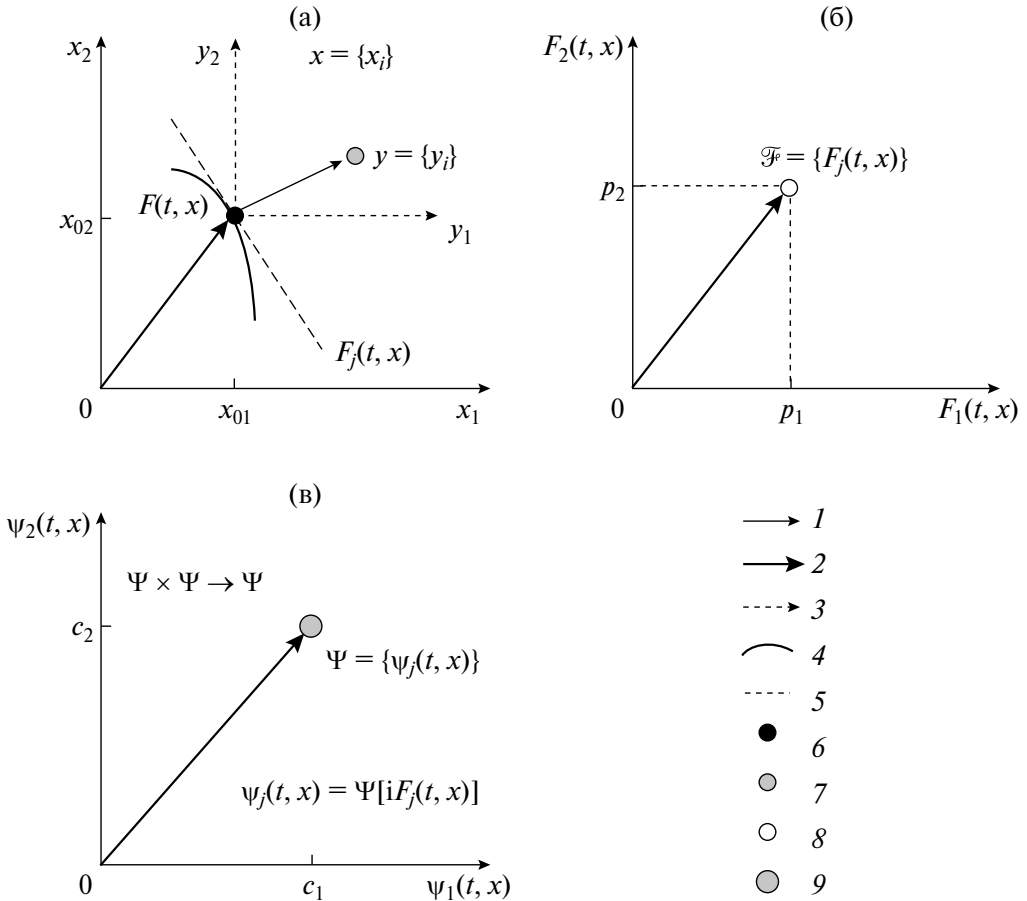


Рис. 1. Поэтапное а-в совершенствование пространственно-временного анализа: а – двухмерное факторное пространство $x = \{x_i\} \in X(t, x)$; б – представление расслоенного пространства в виде вектор-функции $F = \{F_j(t, x)\}$; в – функциональное, гильбертово пространство $\Psi = \{\psi_j(t, x)\}$ суперпозиции функций вида (3). Условные обозначения: 1 – оси координат переменных и функций; 2 – векторы различных форм (радиус-вектор, вектор-функция, суперпозиция функций); 3 – локальные координаты $y = \{y_i\}$; 4 – кривая или поверхность функции многообразия $F(t, x)$; 5 – линия (луч, плоскость) $F_j(t, x)$, касательная в точке x_0 . Состояния системы: 6 – в точке $F(t, x_0)$; 7 – в локальной системе координат $y = \{y_i\}$; 8 – в виде вектор-функции с весами p ; 9 – в форме суперпозиции Ψ -функций с весами c .

Fig. 1. Step-by-step improvement of spatial and temporal analysis: а is a two-dimensional factor space $x = \{x_i\} \in X(t, x)$; б is a representation of a fiber bundle in the form of a vector-function $F = \{F_j(t, x)\}$; в is a Hilbert functional space $\Psi = \{\psi_j(t, x)\}$ as superposition of functions of the form (3). Symbols: 1 – coordinate axes of variables and functions; 2 – vectors of various shapes (radius-vector, vector-function, superposition of Hilbert functions); 3 – local coordinates $y = \{y_i\}$; 4 – curve or surface of a function $F(t, x)$ of a manifold M ; 5 – line (ray, plane) $F_j(t, x)$, tangent at point x_0 . The states of the system: 6 – at the point $F(t, x_0)$; 7 – in the local coordinate system $y = \{y_i\}$; 8 – in the form of a vector-function with weight vector $p = \{p_j\}$; 9 – in the form of a superposition of Ψ -functions with weight vector $c = \{c_j\}$.

где $a_j y_j$ – скалярное произведение двух векторов $y_j = \{y_{ij}\}$ и $a_j = \{a_{ij}\}$; v_j – скорость изменения $F_j(t, x)$; a_j – показатели чувствительности изменения $F_j(t, x)$ к влиянию факторов y_j ; $f_j(t, y) = F_j(t, x) - F_{0j} = v_j t + a_j y_j$, $F_{0j} = F_j(0, x_{0j})$. Под $y_j = x - x_{0j}$ будем понимать относительную величину – разницу высоты x местоположения участка ландшафта в рельефе и модального значения высоты $x = x_{0j}$, соответствующего максимуму частотного распределения площадей геомера j -го типа, в границах ареала которого находится этот участок.

Функция типового слоя $f(t, y)$ (без j) задается в относительных координатах $y = x - x_{0j}$, в показателях отклонения от нормы x_0 – точки касания слоем системной функции $F(t, x)$ в позиции $F_0 = F(t, x_0)$ (см. рис. 1а). В относительных показателях y и $f(t, y)$ функции разных слоев $f_j(t, y)$ имеют эквивалентные выражения, сопоставимые с точностью до преобразований $f_j(t, y) \rightarrow f_i(t, y) = v_i t + a_i y$. Функции $F_j(t, y)$ и $f_j(t, y)$ далее считаются безразмерными, для чего они мысленно домножаются на соответствующий постоянный коэффициент. При анализе проблемы удобно рассуждать в понятиях типового слоя, понимая при этом, что выводы аналогичным образом воспроизводятся в конкретных j -х слоях (геомерах).

При переходе к гильбертовым пространствам в расслоение Ω добавляются элементы группы Ψ (рис. 1б), действующие на себя $\Psi \times \Psi \rightarrow \Psi$, например, в виде функциональной надстройки над слоем $\Psi[iF_j(t, x)] = A \exp[iF_j(t, x)]$, где i – мнимая единица $i^2 = -1$. Координаты гильбертова пространства – это комплекснозначные независимые функции $\psi_j(t, x) = \Psi[iF_j(t, x)]$, групповые операции с которыми дают функции того же вида. Например, умножение на линейный унитарный оператор $U(t_2, t_1)$ функции К-состояния $\psi(t_1, x)$ переводит его в новое К-состояние $\psi(t_2, x) = U(t_2, t_1)\psi(t_1, x)$, благодаря чему отображается временная эволюция К-системы или ее изменение от места к месту.

Уравнение

$$\psi_j(t, x) = \Psi[iF_j(t, x)] = A \exp[iF_j(t, x)] = A \exp[i(v_j t + a_j y_j + F_{0j})] \quad (2)$$

в волновой оптике описывает изменения волновых полей $\psi_j(t, x)$ через амплитуду A и фазу $F_j(t, x)$ волны (эйконал), где $\omega = -v_j$ – угловая частота волны, $a_j = \omega \mathbf{n}/c$ – волновой вектор; $\mathbf{n}$ – единичный вектор в направлении распространения волны со скоростью c ; F_{0j} – фазовое смещение, индивидуальное для каждой точки x_{0j} пространства. Градиентный вектор $a_j = \text{grad} \psi_j$ определяет направление луча распространения фронта волны, поэтому градиент эйконала $F_j(t, x)$ направлен вдоль луча, что связывает волновую оптику с линейной. Лучи – это касательные линии к границе многообразия, известного в геометрической оптике как каустика, т.е. огибающая лучи поверхность (см. рис. 1а). В географии она трактуется как среда реализации разных причинно-следственных связей [32].

При учете фазового смещения F_{0j} , когда $f_j(t, y) = F_j(t, x) - F_{0j} = v_j t + a_j y$ волновая функция приобретают вид, не зависящий от локальных условий, инвариантный относительно фазы $F_j(t, x) - F_{0j}$. В физике поля функции, обеспечивающие инвариантность поля $\psi_j(t, y) = A \exp[i f_j(t, y)]$ относительно фазовых преобразований $\exp[iF_{0j}]$, называются калибровочными полями (космическим ландшафтом): $\psi_j(t, x) = A \exp[i f_j(t, y)] \exp[iF_{0j}]$; $\exp[iF_{0j}]$ – унитарный оператор внутреннего пространства, переводящий универсальный закон $\psi_j(t, y) = A \exp[i f_j(t, y)]$ в локальную закономерность $\psi_j(t, x) \rightarrow \psi_j(t, y) \exp[iF_{0j}]$ путем сдвига значения эйконала на величину F_{0j} : $F_j(t, x) = f_j(t, y) + F_{0j}$. Здесь наблюдается прямая аналогия с полем географической среды, которое действует локально, и его учет в закономерностях связи процессов и явлений приводит к универсальным законам, не зависящим от средового пара-

метра $F_0: f_j(t, y) = F_j(t, x) - F_0$. Прослеживается наглядная связь касательной функции слоя $F_j(t, x)$ с координатой гильбертова пространства $\psi_j(t, x) = \Psi[iF_j(t, x)]$ (см. рис. 1 б, в), что формализуется через соответствие тривиального и главного расслоений [26].

К-состояние геосистемы $|\psi_j\rangle$ соответствует функции ψ_j дискретного типа (2) геосистемы j (типу геомера). Чистое К-состояние математически может быть описано волновой функцией (волновая механика), вектором состояния (матричная механика) или полным набором К-чисел, например, для химических элементов, определяющих их положение в периодической системе Д. И. Менделеева. Функцию $\psi_j(t, y)$ времени t и координат y по аналогии с волновой функцией в квантовой механике будем называть геоинформационной Ψ -функцией. Состояние неоднородной геосистемы (геохоры, полисистемы) определяется суперпозицией К-состояний (векторов) входящих в нее m геомеров (см. рис. 1в)

$$\Psi = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + \dots + c_j|\psi_j\rangle + \dots + c_m|\psi_m\rangle, \quad (3)$$

где c_j – постоянные весовые коэффициенты, квадрат модуля $p_j = |c_j|^2$ которых соответствует возможности встретить на территории геосистему j -го типа (доля площади ареалов j -го геомера). Состояние $|\psi_j\rangle$ и $c_j|\psi_j\rangle$ считается одним и тем же К-состоянием. Наблюдаемая пространственная структура территориального образования соответственно отображается формулой

$$P = p_1P_1(t, y) + p_2P_2(t, y) + \dots + p_jP_j(t, y) + \dots + p_mP_m(t, y), \quad P_j(t, y) = P\langle\psi_j|\psi_j\rangle, \quad (4)$$

где $\psi_j^* = \langle\psi_j|$ – сопряженное к $|\psi_j\rangle$ состояние такое, что $\phi_j = \langle\psi_j|\psi_j\rangle = \|\psi_j\|^2$ – квадрат модуля функции ψ_j . Величина $P_j(t, y) = P\langle\psi_j|\psi_j\rangle = P(\psi_j^*\psi_j(t, y))$ соответствует изменяющемуся во времени распределению доли площади j -го геомера по географической характеристике y . Оператор P преобразует $\langle\psi_j|\psi_j\rangle \rightarrow P_j(t, y)$. В физической науке $P_j(t, y) = \langle\psi_j|\psi_j\rangle$. В географии это преобразование не прямое, а состоит, как следует из дальнейшего текста, из нескольких этапов.

Описание территориальной целостности с помощью Ψ -функции происходит в гильбертовом, функциональном пространстве комплекснозначных функций вида

$$\psi_j(t, y) = \psi_0\psi_y(t)\psi_{xy}(y) = \psi_0 \exp[(\lambda + \lambda_0 i)t] \cdot \exp[(\alpha + \alpha_0 i)y], \quad (5)$$

где $\alpha, \alpha_0, \lambda, \lambda_0$ – действительные константы; ψ_0 – амплитуда изменений, которую можно принять за единицу; $j = 1, 2, \dots, m$ – номер координаты $|\psi_j(t, y)\rangle$; сопряженная $\psi_j(t, y)$ функция $\psi_j^*(t, y) = \exp[(\lambda - \lambda_0 i)t] \cdot \exp[(\alpha - \alpha_0 i)y]$. В данном случае квадрат модуля $\psi_j(t, y)$ – действительная величина вида:

$$\langle\psi_j|\psi_j\rangle = \psi_j(t, y) \cdot \psi_j^*(t, y) = \exp(2\lambda t) \cdot \exp(2\alpha y). \quad (6)$$

При $\lambda = v\alpha, \lambda_0 = v\alpha_0, \alpha_0 = \pm\alpha$ (v – скорость эволюционных изменений) (5) удовлетворяет [27] дифференциальному уравнению:

$$2i \frac{\partial^2 \Psi_j(t, y)}{\partial t^2} = \left(\frac{v}{\alpha}\right)^2 \frac{\partial^4 \Psi_j(t, y)}{\partial y^4}, \quad (7)$$

многие решения которого различаются по собственным значениям $\alpha = \alpha_j$:

$$\psi_j(t, y) = \psi_y(t)\psi_{xy}(y) = \exp[v\alpha_j(1+i)t] \exp[\alpha_j(1+i)y], \quad (8)$$

и состоят из наложения временной $\psi_y(t) = \exp[v\alpha_j(1+i)t]$ и пространственной составляющих $\psi_{xy}(y) = \exp[\alpha_j(1+i)y]$, удовлетворяющих соответственно дифференциальным уравнениям

$$a) i d^2 \psi_t(t)/dt^2 = -2(v\alpha)^2 \psi_t(t), \text{ б) } d^4 \psi_y(y)/dy^4 = -4\alpha^4 \psi_y(y). \quad (9)$$

Уравнение (7) аналогично линейному дифференциальному уравнению Шрёдингера, описывающему физическое изменение в пространстве и во времени чистого состояния, задаваемого волновой функцией, в гамильтоновых К-системах:

$$\mathbf{H}\Psi(t,x) = i\hbar \frac{\partial \Psi(t,y)}{\partial t} = -\left(\frac{\hbar^2}{2m}\right) \frac{\partial^2 \Psi(t,y)}{\partial y^2}, \quad (10)$$

где m — масса частицы; $\hbar$ — приведенная постоянная Планка (постоянная Дирака), которая в теоретической физике для простоты и общности описания приравнивается к единице.

Эти равенства — функции Гамильтона — представляют собой полную энергию системы, выраженную через координаты и импульсы, а иногда также явно через время $\psi(t,y) = \psi_0 \exp(-iHt/\hbar)$, если $H = H$ не зависит от времени. Гамильтониан генерирует временную эволюцию К-состояний. Оператор $U = \exp(-iHt/\hbar)$ — это унитарный оператор временной эволюции замкнутой К-системы. Умножение Ψ -функции на U пролонгирует, смещает состояние системы во времени.

По аналогии с (10) геосистемный оператор энергии эволюции согласно (7) при $\hbar = 1$ будет иметь вид

$$\mathbf{H} = 2i \frac{\partial^2}{\partial t^2} = \left(\frac{v}{\alpha}\right)^2 \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (11)$$

Согласно (11) функция (5) $\psi_y(t) = \exp[(\lambda + \lambda_0 i)t]$ имеет собственные значения $\lambda + \lambda_0 i = \pm(1+i)v\alpha$, соответствующие взрывному росту (+) или затуханию (−) явлений во времени, например, в географическом цикле рельефообразования. Временные изменения $\psi_t(t)$ накладываются на существующую форму рельефа $\psi_y(y)$, что задается уравнением (5) с четырьмя собственными значениями $\alpha + \alpha_0 i = \pm(1\pm i)\alpha$ разного геоморфологического содержания (положительные и отрицательные формы рельефа, возвышения и скаты местности). Соотношение коэффициентов в уравнениях (10) и (11) имеют сходную размерность $[\hbar/m] = [v/\alpha] = \text{площадь/время}$, но отличаются масштабом величин. Согласно (9) и (11) собственное значение оператора $H = 2i[v\alpha(1+i)]^2 = -4(v\alpha)^2$ отрицательно определяется коэффициентами временной v и пространственной α изменчивости, так что при отсутствии изменений $v = 0$ или ровном рельефе $\alpha = 0$ энергия будет максимальной $H = 0$; в иных случаях энергия рельефа находится в «потенциальной яме» $H < 0$.

Для процесса в потенциальном поле V , эволюционный оператор смены К-состояний смещен на потенциал этого поля: $\hat{H} = H + V$. В случае простого гармонического осциллятора (упругого колебания вокруг центра) потенциал зависит от величины отклонения y_j от нормы: $V = k|a_j \cdot y_j|^2/2$, где k — коэффициент упругости; $|a_j \cdot y_j|^2 = \sum (a_{ij} y_{ij})^2$.

С учетом соотношения Эйлера $\exp(\pm i\alpha y) = \cos(\alpha y) \pm i \sin(\alpha y)$ общее решение уравнения (9б) при одной независимой переменной y будет иметь вид (C_1, C_2, C_{12}, C_{34} — константы):

$$\psi_y(y) = [C_1 \cos(\alpha y) + C_2 \sin(\alpha y)][C_{12} \exp(\alpha y) + C_{34} \exp(-\alpha y)].$$

Частное решение находится на интервале значений фактора $y \in [0, y_m]$, на концах которого $\psi_y(0) = A$, $\psi_y(y_m) = 0$. Отсюда $C_1(C_{12} + C_{34}) = A$, $\cos^2(\alpha y_m) = 0$, или $\cos^2(\alpha y_m) = (1/2)(\cos(2\alpha y_m) + 1) = 0$, или $\cos(2\alpha y_m) = -1$, т.е. $2\alpha y_m = \pi + \pi J$, где J — собственные числа решений уравнения (9б), каждое из которых соответствует типу гео-

системных функций $F_j(t, x), f_j(t, y), \psi_j(t, y)$ вида (8). Значение коэффициента α_j зависит от К-числа J и величины y_m интервала изменчивости и квантуется с шагом $\alpha_j = \pi/2y_m$. При этом $J = (\alpha y_m - \pi/2)/\pi$. При увеличении множества координат факторного пространства $x = \{x_j\}$ возрастает количество видов К-чисел. Квантованность через α_j переносится на другие географические константы, например, собственное значение эволюционного оператора $H_j = -4(\nu\alpha_j)^2$ имеет несколько энергетических уровней J .

Пространственно-временные Ψ -функции гильбертова пространства в общем случае имеют вид (8), а квадрат их модуля

$$\phi_j(t, y) = |\psi_j(t, y)|^2 = \exp[\beta_j(\nu t + y)], \beta_j = 2\alpha_j \quad (12)$$

указывает, как непосредственно наблюдаемая величина $\phi_j(t, y)$ изменяется за счет смещения величины аргумента y во времени: $y + \nu t$. Для применения аналитических средств К-теории необходимо найти пример экспоненциальной наблюдаемой в географических исследованиях. Такой Ψ -функцией может быть безразмерная вероятностная величина интегрированной опасности (ИО) в теории надежности [28].

Рассматривается случай стационарного распределения площадей ареалов геоморфов $P_j(x)$ (в долях от единицы) разного рода j по грациям высоты $x = y + x_{0j}$. Эта величина связана с мерой надежности системы $1 \geq P_j^*(x) \geq 0$, которая снижается с ростом высоты местоположения x , а надежность, в свою очередь, определяет значение ИО $E_j(x) \geq 0$ — вероятности системой не достигнуть состояния с характеристикой x :

$$P_j(x) = -\frac{dP_j^*(x)}{dx}, \quad E_j(x) = -\ln P_j^*(x). \quad (13)$$

Значение $E_j(x_{0j}) = 1$ выделяет границу $x = x_{0j}$ существования системы j , выше которой ее нахождение маловероятно.

Хорошую аппроксимацию функции надежности $P_j^*(x)$ дает функция распределения по закону Гумбеля $P_j^*(x) = \exp[-\exp(z_j)]$ [28]. Ее частным вариантом при $z_j = 2\alpha_j y = 2\alpha_j(x - x_{0k})$ является распределение Гомпертца, для которого мера опасности — экспоненциальная зависимость вида (12):

$$E_j(x) = -\ln P_j^*(x) = \exp(z_j) = \exp(\beta_j y) = \exp[\beta_j(x - x_{0k})]. \quad (14)$$

В этом случае функция плотности распределения

$$P_j(x) = \beta_j \exp[\beta_j(x - x_{0k})] \exp\{-\exp[\beta_j(x - x_{0k})]\} \quad (15)$$

имеет максимум при $x = x_{0j}$, что соответствует модальному значению x_{0j} распределения $P_j(x)$. Функция (15) отражает кривую экологической или геосистемной ниши, характеризующую вероятность нахождения объектов в регионе исследования по особенностям их реакции на влияние факторов x , величина которых для точности отражения закономерностей принимается в логарифмическом масштабе $x \rightarrow y = \ln(x/x_{0j})$, что позволяет перевести размерные переменные в относительные и безразмерные — центрировать и нормировать данные, а затем сравнивать их в системах различного рода. Аналогично реализуется переход к относительному (собственному) времени $t \rightarrow \tau = \ln(t/t_0)$ с учетом характерного времени t_0 , когда $\tau = 0$. Это позволяет использовать уравнения К-моделирования для описания процессов различной продолжительности. Во всех К-уравнениях переменные применяются типовым, линейным образом, понимая под ними результат нелинейного преобразования переменных. При статистической обработке данные заранее переводятся в логарифмическую шкалу.

ОБЪЕКТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой статье используются методы картометрии и сравнительно-географического и статистического анализа пространственных структур. В качестве объекта исследования выбраны геосистемы (геомы) территории Байкальской Сибири в административных границах Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края. Геом – это наименьшая типологическая и классификационная единица (геомер) региональной размерности, соответствующая ареалу проявления на территории разновидности типа природной среды (типа ландшафта) и объединяющая по иерархии ареалы классов фаций различных факторальных рядов. На территории исследования выделено 37 геомов, пронумерованных латинскими цифрами I–XXXVII по порядку $N = 1 \div 37$ (индексы $j, l \in N$) следования в легенде ландшафтной карты [13].

Территория расположена в центре материка Евразия в поясе умеренных широт. Горный и горно-равнинный характер рельефа определяет здесь суровые резкоконтинентальные и одновременно с этим разнообразные природно-климатические условия. Регион включает в себя оз. Байкал и примыкающие к нему регионы Предбайкалья и Забайкалья. В пределах региона соседствуют четыре физико-географические области: Южно-Сибирская горная, Байкало-Джугджурская горно-таежная, Средне-сибирская таежно-плоскогорная и Северо-Монгольская полупустынно-степная, которые отличаются своеобразием природно-ландшафтных условий и исторического развития, определяющих характер пространственно-временной изменчивости геосистем. Названные обстоятельства указывают на развитие в регионе Байкальской Сибири широкого спектра геосистем, относящихся к трем типам природной среды (гольцовой, таежной, степной), что объясняется высоким разнообразием природных условий, ландшафтообразующих факторов и процессов [1, 15].

Исходными данными при анализе пространственно-временной изменчивости послужили высотные параметры геосистем (характерные высоты расположения геомов, структуры размещения выделов геомов по высоте и др.). Для расчета использовалась цифровая модель рельефа (ЦМР) на базе фрагмента глобального покрытия SRTM с разрешением 3 угловых секунды. Расчет высотных характеристик осуществлен на основе электронного варианта карты «Ландшафты юга Восточной Сибири» [13] и цифровой модели рельефа (ЦМР) методом наложения данных: произведен оверлей ЦМР на сетку выделов геомов. Для этого ЦМР экспортировалась в векторный полигональный вид в программе QGIS, а затем в программе ArcView проводился совместный анализ векторного слоя ЦМР с векторной сеткой ландшафтных выделов, в результате чего получена матрица-таблица встречаемости площадей (в условных единицах) участков различных геомов по высоте. Затем в табличном виде в Excel эти площади объединялись $S_j(x)$ с шагом 100 м по высоте x и рассчитывались частотные доли $P_j(x) = S_j(x)/S_{0j}$ площади геомов (S_{0j} – суммарная площадь j -го геоба на территории).

Далее, согласно (13), последовательно по грациям вычитая из 1 значения $P_j(x)$ до 0, находим величину надежности $P_j^*(x)$ для каждой высоты x местоположения и вычисляем меру опасности $E_j(x) = -\ln P_j^*(x)$ для каждого геоба j (табл. 1). По соотношению (14), статистически исследуем зависимость $E_j(x)$ от высот x , а именно связь $E_j(x) = E_{0j} \exp[\beta_j(x - x_{0k})]$, для чего это равенство логарифмируем $\ln E_j(x) = \beta_j x - \beta_j x_{0k} + \ln E_{0j}$ и методом линейной регрессии определяем коэффициенты β_j и $\eta_j = -\beta_j x_{0j} + \ln E_{0j}$, откуда $x_{0j} = -(\eta_j - \ln E_{0j})/\beta_j$ для каждого геоба. Вычисления проводились с использованием электронных таблиц программы Excel.

Табл. 1. Этапы преобразования данных распределения площадей $S_j(x)$ геома IX ограниченного развития горнотаежных лиственничных лесов в Байкальской Сибири по грациям высоты X (интервал 100 м)

Table. 1. Stages of transformation of area distribution $S_j(x)$ of geome IX of limited developed mountain larch taiga in Baikal Siberia by height x (gradient step size 100 m)

$x, м$	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
$S_j(x)$	10	49	89	144	240	338	410	354	325	224	143	95	56	46	20
$P_j(x)$	0.004	0.019	0.034	0.056	0.093	0.131	0.159	0.137	0.126	0.087	0.055	0.037	0.022	0.018	0.008
$P^*_j(x)$	1.00	1.00	0.98	0.94	0.89	0.79	0.66	0.50	0.37	0.24	0.16	0.10	0.06	0.04	0.02
$E_j(x)$	0.00	0.00	0.02	0.06	0.12	0.23	0.41	0.68	1.00	1.42	1.86	2.30	2.76	3.18	3.73
$\ln E_j(x)$	—	-5.55	-3.77	-2.83	-2.12	-1.47	-0.89	-0.38	0.00	0.35	0.62	0.83	1.01	1.16	1.32

Определяется встречаемость $P_j(x)$ разных геомов j по высоте x (рис. 2а). По характеру распределения выделяются группы горных и подгорных геомов по расположению, величине максимальных значений и амплитуде варьирования по высоте. По кривым определяются модальные значения x_0 распределений, которые с шагом 400 метров подразделяются примерно на четыре К-уровня.

Статистически исследуется линеаризованная зависимость

$$\ln E_j(x) = \beta_j \ln x + \eta_j \tag{16}$$

ИО $E_j(x)$ от $\ln x$ высотного положения x (рис. 2б). В большинстве случаев коэффициент корреляции $R > 0,95$. По разным геомам j равенство (16) представляет собой пучок линий (рис. 2б), коэффициенты которых связаны соотношением (рис. 3а)

$$\eta_j = -\beta_j \ln x_0 + \ln E_0 \tag{17}$$

с постоянными значениями $\ln x_0 = 6,297$, $x_0 = 543$ м и $\ln E_0 = -1,823$, $E_0 = 0,162$ — общими для разных геомов, что означает функциональное единство их набора

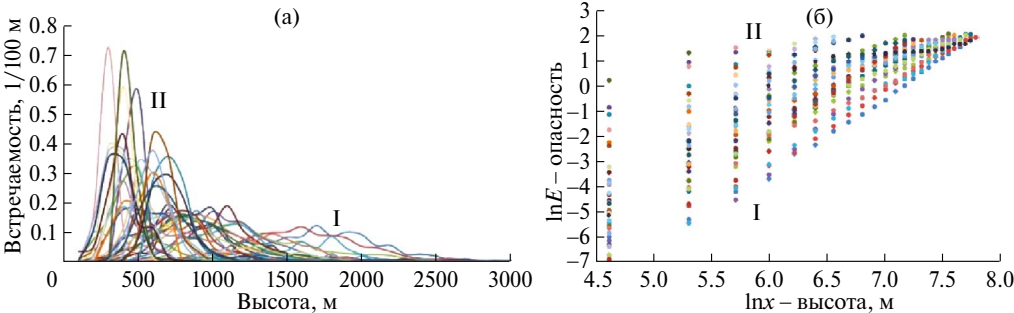


Рис. 2. а — сглаженные кривые распределения (встречаемости) разных геомов по высоте с шагом 100 м; б — зависимость величины интегрированной опасности от высоты местоположения (логарифмическая шкала): I — группа горных геомов, II — группа подгорных геомов.

Fig. 2. а — smoothed distribution curves (occurrence) of different geomorphs with height gradient step size 100 m; б — dependence of the value of the integrated hazard on the height location (logarithmic scale): I is a group of mountain geomorphs, II is a group of sub-mountain geomorphs.

на территории. Величина $\ln x_0 \approx 2\pi$ – характерная высота, деление x/x_0 на значение которой переводит абсолютные величины в относительные. Согласно (17), квантованность величины β_j предполагает квантованность и значений η_j . При подстановке (17) в (16) получаем универсальную зависимость $\ln[E_j(x)/E_0] = \beta_j[\ln(x/x_0)]$ в безразмерных переменных $Y = \ln[E_j(x)/E_0]$ и $y = \ln(x/x_0)$ типа $Y = \beta_j y$. Это означает, что для перехода от зависимости для одного геома j к другому l необходимо просто изменить величину коэффициента $\beta_j \rightarrow \beta_l$, подставить соответствующее значение β_l : $Y = \beta_l y$. Иными словами, требуется повернуть линию связи $Y = \beta_j y$ на новый угол φ_l ($\beta_l = \tan \varphi_l$) (см. рис. 2б). Отсюда также следует коррелированность линейных зависимостей ИО, например, $\ln E_l(x) = 0,808 \ln E_j(x) + 0,541$, $R = 0.99$ для связи геома (j , VI) редуцированного развития лиственничной горной тайги с подгольцовым лиственнично-редколесным и каменноберезовым геомом (l , IV), что указывает на снижение разнообразия вертикальной структуры геомов при переходе от VI к IV.

Используем аналитическую зависимость $\beta_j y_m = \pi + \pi J$ для вычисления по значениям коэффициента высотно-поясной изменчивости $\beta_j = 2\alpha_j$ значений К-числа $J = \beta_j y_m / \pi - 1$ (рис. 3б). Для выявления числовой дискретности величина для всех геомов принята $y_m = 2,2$. Для первых по порядку геомов от гольцовых альпинотипных (I) до подгорных и межгорных понижений таежных темнохвойных геомов ограниченного развития прослеживается снижение К-уровней значений β_j с 3 до 0. Минимальное значение $\beta_j y_m = \pi + \pi J$ наблюдается при $J = 0$ и равно $\beta_0 = \pi / y_m \approx 1,589 / 100$ м по результатам расчета, что соответствует подгорным и межгорным понижениям таежному темнохвойному геому (XVI) и таежному кедрово-лиственничному геому (XVII) – оба ограниченного развития. Значение $y_m = \pi / \beta_0 = 1,976 \approx 2$ – это базовая амплитуда колебания изменчивости y , которая позволяет переводить размерные коэффициенты β_j в безразмерные $\beta_j y_m$, сравнивая их с числами.

В первом приближении качественная эволюция геомов исследователями рассматривается как серия скачкообразных переходов состояния геомов с одного К-уровня на другой с изменением пространственного и временного положения (рис. 4). В данном случае, величина скачка $v \beta_j \Delta \tau_j$ в выбранных единицах измерения соответствует одному кванту изменений $\Delta \beta_j y_m = \pi$ – универсальной математической константе π , соответствующей минимальному значению коэффициента изменчивости $\beta_j y_m = \pi$.

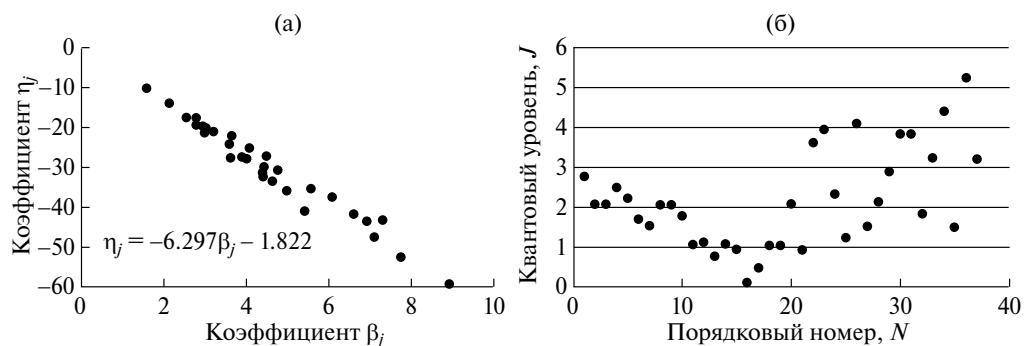


Рис. 3. а – зависимость коэффициентов η_j и β_j расчетной формулы $\ln E_j(x) = \beta_j \ln x + \eta_j$; б – квантовые уровни J К-состояний геомов по коэффициенту β_j . Точки – расчетные данные, линии – квантовые уровни $J = \beta_j y_m / \pi - 1$.
Fig. 3. а – dependence of the coefficients η_j and β_j of the calculation formula $\ln E_j(x) = \beta_j \ln x + \eta_j$; б – quantum levels J of the quantum states of geomes by the coefficient β_j . Points are calculated data, lines are quantum levels $J = \beta_j y_m / \pi - 1$.

За время $\Delta\tau = 1$ система изменяется $y_m \Delta\beta_j$ на один $\Delta J = 1$ квант π с разной скоростью v_j и постоянным периодом $y_m = v_j \Delta\tau_j$: $v_j \Delta\tau \beta_j = y_m \beta_j = \pi + \pi J$. Изменения в пространственной структуре показаны на графе (рис. 4), отражающем направления перехода из одного геомы (квантового уровня) к другому в соответствии с разработанными схемами [19] отношения пространственного и временного соседства. Группа точек одного К-уровня на графе (рис. 4) различаются по дополнительному К-числу, смысл и значение которого необходимо еще определить, принимая во внимание многомерность пространства факторов влияния. В одномерном случае собственное значение эволюционного оператора (энергии процесса) $H_j = -4(v_j \alpha_j)^2 = -(v_j \beta_j)^2$ по абсолютному значению равно квадрату произведения коэффициентов временной v_j и пространственной β_j изменчивости – величине дискретной, различающейся по К-уровнями J и по геомам j .

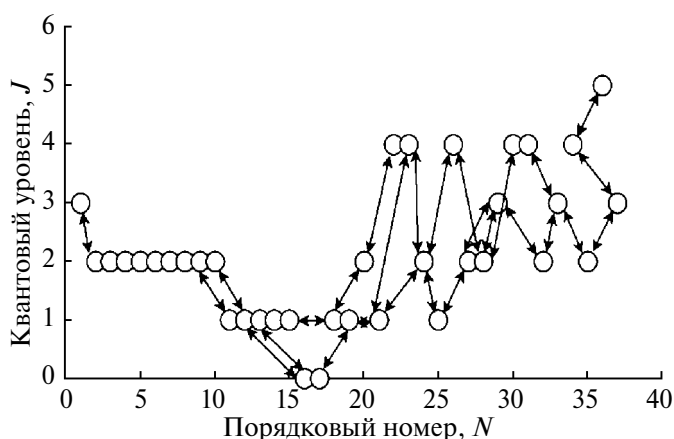


Рис. 4. Квантовые уровни J геомов и возможные направления их временной трансформации.

Fig. 4. Quantum levels of J geomes and possible directions of their temporal transformation.

Проведенный математический и статистический анализ доказывает правомерность К-подхода и предлагает методы расчета параметров моделей. Особенно это касается вычисления коэффициента пространственной $\alpha_j = \beta_j/2$ и временной $\lambda_j = v_j \beta_j$ изменчивости со скоростью v_j в логарифмических переменных, когда изменения протекают в собственном ритме $\tau = \ln(t/t_0)$ в масштабе характерного времени t_0 изучаемой геосистемы. В соответствии с уравнением (1) в геомном слое $f_j(\tau, y) = v_j \alpha_j \tau + \alpha_j y_j = v_j \alpha_j \tau + \alpha_j \ln(x - x_0)$ динамическое равновесие $f_j(\tau, y) = 0$ наступает в момент $t = t_0$ в условиях $x = x_0$ оптимума существования геосистемы данного типа. В динамическом процессе со скоростью v_j состояние системы либо отклоняется от этого оптимума, постепенно меняя значение переменной x , либо квантовым скачком $j \rightarrow l$ переходит в факторальную область другого геомы с оптимумом в точке x_{0l} . На этом в методе ординации основывается традиционный прием прогнозирования динамических и эволюционных изменений растительного покрова путем смещения значений факторов влияния и положения оптимума.

Имеется возможность картографировать состояния геомов по величине соответствующего К-числа (рис. 5). В Байкальской Сибири большую часть площади

занимают геомы 2-го К-уровня (47,7%) – гольцовые, подгольцовые и горнотаежные редуцированного развития. На втором месте по распространению (27,2%) находится первый К-уровень, представленный горнотаежными и подгорными лесами ограниченного и оптимального развития. Они обычно встречаются в котловинах байкальского и забайкальского типа. На третьем месте (13,7%) по распространению находятся геомы 4-го К-уровня. Это в основном подгорные и равнинные таежные леса разного породного состава. Далее в порядке убывания идет 3-й уровень (7,9%) темнохвойной южной тайги возвышенностей, луговые и травяно-пижмовые степи плакорных равнин, 0-й уровень (2,9%) подгорных и межгорных понижений темнохвойной и кедрово-лиственничной тайги ограниченного развития, наконец, 5-й уровень (0,7%) – травяно-пижмовые степи высоких местоположений.

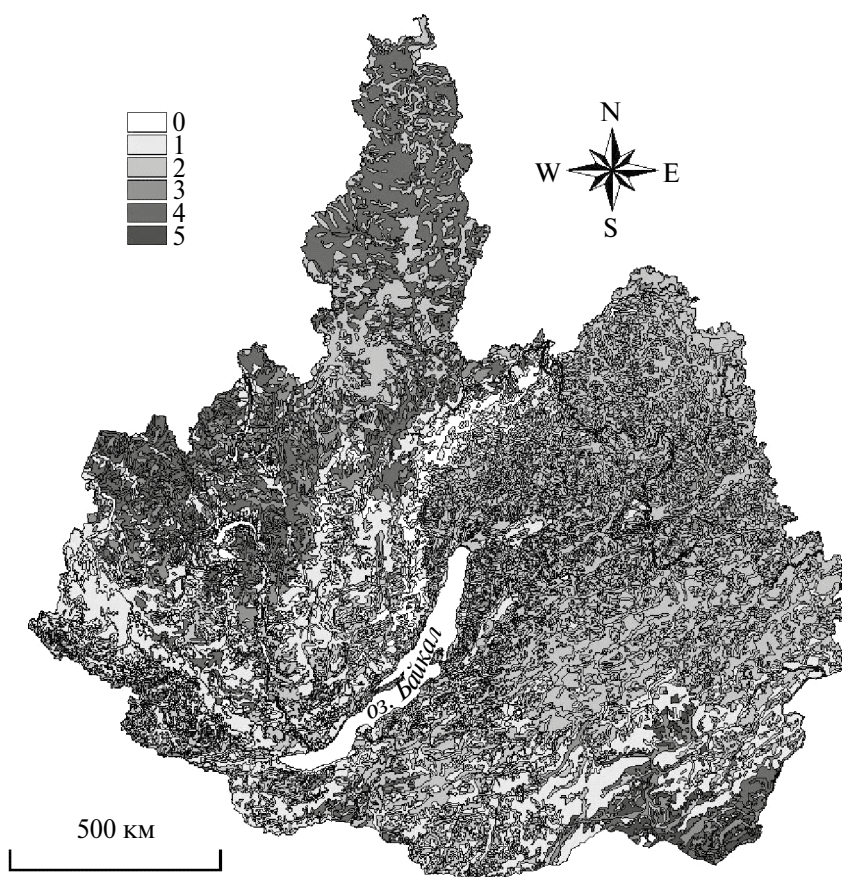


Рис. 5. Квантовые уровни (0–5) пространственно-временной изменчивости геомов Байкальской Сибири по географической характеристике высоты местоположения. Показаны границы ареалов разных геомов.
Fig. 5. Quantum levels (0–5) of the spatiotemporal variability of the geomes of Baikal Siberia according to the geographical characteristics of the location height. The boundaries of different geome sare shown.

Доля площади геомов на территории (встречаемость) соответствует весовым коэффициентам p_j в уравнении (4), моделирующем пространственную структуру региона (см. рис. 1б). Опасность существования (сохранения состояния) компонентов геосистем, судя по K -значениям, возрастает при переходе от равнинных к горным формированиям ($J = 0 \rightarrow 5$). Напротив, максимальная энергия эволюционных пространственно-временных преобразований приходится на 0-уровень, что соответствует тайге подгорных и межгорных понижений. Изменения в пространственную структуру геоизображения (см. рис. 5) вносятся на основе графа (см. рис. 4), отражающего направления перехода от одного геомов (квантового уровня) к другому квантовым скачком $\Delta J = 1$ за один такт Δt , на один квант $y_m \beta_j = \pi$.

Для количественного описания наблюдаемой зависимости $E_j(t, y)$ используется соотношение (12), за которым стоит виртуальное K -уравнение $\psi_j(t, y)$ (8) и определяющие его дифференциальные уравнения K -теории (7)–(9). Реализуется заявленное преобразование P :

$$\psi_j(t, y) \rightarrow \langle \psi_j | \psi_j \rangle \rightarrow E_j(y) \rightarrow P_j^*(x) \rightarrow P_j(x).$$

По функции ИО $E_j(t, y)$ восстанавливаются функции надежности $P_j^*(x)$ и плотности распределения $P_j(x)$ площади геомов по высоте $x = y + x_0$ и его изменения со временем и в пространстве с учетом фазового (средового) смещения x_0 . Таким образом реализуется исследовательский цикл дискретного анализа пространственной информации ландшафтной структуры территории Байкальской Сибири на уровне геомов. Здесь открывается новое обширное поле для количественных исследований ландшафтной структуры, для понимания территориального единства геосистем.

ВЫВОДЫ

Квантовая теория рассматривается как сквозная теория научных знаний, направленная на описание дискретных процессов и явлений в природе и обществе. В физической науке уравнения данной теории позволяют практически полностью описать все, что происходит и может происходить с системой, в математических терминах гильбертова пространства, отобразить набором квантовых чисел ее состояния. Предполагается, что геосистемы также могут быть однозначно описаны в соответствующих понятиях с учетом специфики географического знания, что продемонстрировано на примере высотно-поясной геомной структуры территории Байкальской Сибири.

По причине использования в географии разнокачественных независимых переменных и различия их размерности (измерения и масштаба) наблюдаемые величины должны быть центрированы и нормированы посредством логарифмирования их значений для выявления фундаментальных закономерностей. Функции плотности вероятности и соответствующие частотные распределения явлений по градациям этих величин рассматриваются в рамках теории надежности и их описание в итоге сводится к функциям и кривым интегрированной опасности и далее к скрытым (виртуальным) информационным Ψ -функциям квантовой теории. Прослеживается обратная процедура перехода от Ψ -функций к функциями плотности вероятности (встречаемости) для каждого геомов. Свойства топологической дискретизации геомов напрямую связывается с квантованностью коэффициентов уравнений влияния факторов среды на пространственно-временную изменчивость распределений. Географическая среда учитывается как фазовое смещение Ψ -функций, что отражается на положении максимумов встречаемости ареалов геомов разного типа. Таким

образом обосновываются известные методы сравнения и прогнозирования динамики и эволюции геосистем и предлагаются новые процедуры расчета структурной изменчивости.

Дискретный переход от Ψ -функции одного геоба к функции другого формально осуществляется резким поворотом линейной зависимости — сменой коэффициента пространственной изменчивости и модального значения высоты, что реально поэтапно происходит в географическом цикле горообразования. Логарифмические преобразования переменных, перевод их в относительные величины позволяет выделить в данных кванты, равные значению π , дискретного перехода с одного уровня на другой, что обосновывается теоретически. Реализована итерационная корректировка теоретических позиций в соответствии с результатами обработки данных, необходимая для лучшего объяснения и понимания географических закономерностей.

Получается, что в перспективе география может быть такой же точной и строгой наукой, как современная физика в силу сквозного характера квантово-теоретического знания, описывающего дискретные явления. Только для этого необходима адекватная интерпретация геосистем в рамках единой квантовой теории. Чем сложнее формальные конструкции (числа, переменные, функции, операторы), тем проще и полней математическое объяснение реальности. Например, для учета климатического и антропогенного влияния в оператор (гамильтониан), генерирующий эволюцию квантовых состояний, просто добавляются операторы потенциального поля воздействия. Сложные и целостные конструкции геосистем (геохоры) оказываются возможны благодаря реализации принципа суперпозиции дискретно-квантовых систем (геомеров). В целом, исследования в области геосистемного моделирования на языке квантовой теории имеют хорошую перспективу, дополняют другие методы пространственно-временного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкальский регион: общество и природа. Атлас / Ред. А.Р. Батуев, Л.М. Короткий, В.М. Плюснин. М.: Паулсен, 2021. 320 с.
2. Бакланов П.Я. Подходы и основные принципы структуризации географического пространства // Известия АН СССР. Сер. геогр. 2013. №5. С. 7–18.
3. Виноградов Б.В. Космические методы изучения природной среды. М.: Мысль, 1976. 286 с.
4. Виноградов Б.В., Черкашин А.К., Горнов А.Ю., Кулик К.Н. Динамический мониторинг деградации и восстановления пастбищ Черных Земель // Проблемы освоения пустынь. 1990. № 1. С. 10–19.
5. Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А. Модельные оценки влияния изменений климата на ареалы зональной растительности равнинных территорий России // Известия РАН. Сер. биол. 2007. № 2. С. 212–228.
6. Инсаров Г.Э., Борисова О.К., Корзухин М.Д., Кудяров В.Н., Минин А.А., Ольчев А.В., Семенов С.М., Сиринов А.А., Харук В.И. Природные экосистемы суши // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 190–265.
7. Коломыц Э.Г. Прогноз влияния глобальных изменений климата на ландшафтную структуру горной страны // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1985. №1. С. 14–30.
8. Коломыц Э.Г. Прогнозная оценка зональных ландшафтно-экологических условий в свете предстоящих глобальных изменений климата // География и природные ресурсы. 1999. №3. С. 5–13.

9. Коломыц Э.Г. Региональная модель глобальных изменений природной среды. М.: Наука, 2003. 371 с.
10. Коломыц Э.Г. Локальные механизмы глобальных изменений природных экосистем. М.: Наука, 2008. 427 с.
11. Корниенко С.Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съемки // География и природные ресурсы. 2011. № 1. С. 67–73.
12. Кулик К.Н. Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных ландшафтов. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2004. 248 с.
13. Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта. М 1:1500000 / Ред. О.П. Космакова, В.С. Михеев. М.: ГУГК, 1977. 4 л.
14. Назимова Д.И., Поликарпов Н.П. Возможен ли прогноз лесного покрова Сибири на XXI век? // Природа. 2001. №4. С. 55–62.
15. Природные условия и естественные ресурсы СССР. Предбайкалье и Забайкалье / Отв. ред. В.С. Преображенский. М.: Наука, 1965. 492 с.
16. Салугин А.Н., Кулик К.Н. Математические модели динамики и прогноза эволюции аридных экосистем. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 180 с.
17. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 318 с.
18. Фролов А.А. Прогнозное картографирование изменений ландшафтной структуры Прибайкалья при потеплении климата // Геодезия и картография. 2010. № 9. С. 27–32.
19. Фролов А.А. Принципы прогнозирования геомной структуры Предбайкалья при изменении климата // География и природ. ресурсы. 2011. № 3. С. 133–141.
20. Фролов А.А., Черкашин А.К. Клеточные автоматы – модели эволюционного картографирования ландшафтов юга Восточной Сибири // Информационные и математические технологии в науке и управлении. Часть I. Иркутск.: ИСЭ СО РАН, 2007. С. 231–239.
21. Фролов А.А., Черкашин А.К. Эволюционное геоинформационное моделирование и картографирование // Геодезия и картография. 2009. № 6. С. 40–45.
22. Хромых В.В., Хромых О.В. Использование ГИС-технологий для изучения динамики долинных ландшафтов (на примере долины Нижней Томи) // Вестник Томского гос. ун-та. 2007. № 300-1. С. 230–233.
23. Черкашин А.К. Естественная классификация географических систем: модели представления знаний // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 31. С. 69–87.
24. Черкашин А.К. Иерархическая классификация географических систем // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2021. Т. 35. С. 125–153.
25. Черкашин А.К. Предмет географических исследований: метатеоретический подход // Известия РГО. 2022. Т.154. №2. С.1–19.
26. Черкашин А.К. Классификация геосистем: аксиоматический подход // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 102–126.
27. Черкашин А.К. Квантовая география: задачи типизации, классификации и районирования // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 47. С. 90–106.
28. Черкашин А.К., Лесных С.И., Красноштанова Н.Е. Геоинформационный мониторинг и математическое моделирование развития пандемии коронавируса COVID-19 // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 1 (21). С. 17–35.
29. 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-Zentrumfür Informatik, Dagstuhl Publishing. 2017. Article No. 5. P. 5:1–5:14.

30. *Bittner T.* Is there a quantum geography? // Tambassi, T. (eds), *The Philosophy of GIS / Springer Geography*. Springer Nature Switzerland AG. 2019. P. 209–239.
31. *Cherkashin A.K.* Polysystem Modelling of Geographical Processes and Phenomena in Nature and Society. *Mathematical modelling of natural phenomena*. 2009. Vol. 4. No. 5. P. 4–20.
32. *Cherkashin A.K., Lobycheva I.Yu.* Earth Science Theoretical Models for Quantitative Analysis of Global Spatial Data // *Geography and Natural Resources*. 2020. Vol. 41. No. 2. P. 123–132.
33. *Elliott H.M.* The Structure and Evolution of the Geographic System: a Study in Cultural Change. The University of Oklahoma, Ph.D. 1979. 455 p.
34. *Elliott H.M.* Cardinal Place Geometry // *Geographical Analysis*. 1985. No.17. P. 16–35.
35. *Fischer M.M., Leung Y.* (eds) *Geo Computational Modelling: Techniques and Applications*. Berlin, New York: Springer, 2001. 275 p.
36. *Gessler P.E., Moore I.D., Mckenzie N.J., Ryan P.J.* Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes // *International Journal of Geographical Information Science*. 1995. Vol. 9. No 4. P. 421–432.
37. *Harrison S.P., Prentice I.C., Barboni D., Kohfeld K.E., Ni J., Sutra J.-P.* Ecophysiological and bioclimatic foundations for a global plant functional classification // *Journal of Vegetation Science*. 2010. Vol. 21. No. 2. P. 300–317.
38. *Iliev B.Z.* Fiber bundle formulation of nonrelativistic quantum mechanics // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 2001. Vol. 34(23). P.4887–4918.
39. *Mathian H., Sanders L.* Spatio-temporal Approaches: Geographic Objects and Change Process. Wiley-ISTE. 2014. 176 p.
40. *Phillips J.D.* Landscape Evolution: Landforms, Ecosystems, and Soils. Elsevier Science. 2021. 356 p.
41. *Shugart H.H., Crow T.R., Hett J.M.* Forest succession models: a rational and methodology for modeling forest succession over large regions // *Forest Science*. 1973. Vol.19. No.3. P. 203–212.
42. *Vinogradov B.V., Cherkashin A.K., Gornov A.Yu., Kulik K.N.* Dynamic monitoring of degradation and restoration of pastures in the Black Lands of Kalmykia // *Problems of Desert Development*. New York: Allerton Press, 1990. No.1. P. 7–14.

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

Discrete Analysis of Spatial and Temporal Variability of Geosystems of Baikal Siberia**A. K. Cherkashin,* A. A. Frolov *****V. Sochava Institute of geography SB RAS, Irkutsk, Russia***E-mail: akcherk@irnok.net,****E-mail: f-v1984@mail.ru*

Annotation. The discrete spatial and temporal variability of the geosystem characteristics at the regional level (geomes) on the territory of Baikal Siberia has been theoretically and statistically studied. The concepts and equations of a unified quantum theory aimed at a fractional description of processes and phenomena in terms of the functional state of geomes in the Hilbert space of the superposition of functions of the altitude distribution of geosystems were used. Frequency distributions by elevation gradations were determined based on the combination of an electronic geome map and a digital terrain model. Geomes differ in modal height values corresponding to their highest occurrence — optimal conditions of existence in the territory. Distributions are transformed into indicators of integrated hazard, which are statistically transformed into information functions of through quantum theory. The coefficients of variability of these functions in terms of location height are quantized, differ by geomes, which is confirmed by the results of theoretical analysis. A map of the quantum levels of spatial and temporal variability of the geomes of Baikal Siberia and a scheme of spatial and temporal transitions between quantum levels (geomes) are constructed. The methods of forecasting the dynamics and evolution of geosystems are substantiated and new procedures for calculating the quantum variability of the temporal and spatial position of geomes are proposed.

Keywords: unified quantum theory, functional analysis, spatial and temporal variability, discrete states of geomes, digital relief model, Baikal Siberia

REFERENCES

1. Bajkal'skij region: obshhestvo i priroda. Atlas / Red. A.R. Batuev, L.M. Korytnyj, V.M. Pljusnin. M.: Paulsen, 2021. 320 s.
2. Baklanov P.Ja. Podhody i osnovnye principy strukturizacii geograficheskogo prostranstva // Izvestija AN SSSR. Ser. geogr. 2013. № 5. S. 7–18.
3. Vinogradov B.V. Kosmicheskie metody izuchenija prirodnoj sredy. M.: Mysl', 1976. 286 s.
4. Vinogradov B.V., Cherkashin A.K., Gornov A.Ju., Kulik K.N. Dinamicheskij monitoring degradacii i vosstanovlenija pastbishh Chernyh Zemel' // Problemy osvoenija pustyn'. 1990. № 1. S. 10–19.
5. Golubjatnikov L.L., Denisenko E.A. Model'nye ocenki vlijanija izmenenij klimata na arealy zonal'noj rastitel'nosti ravninnyh territorij Rossii // Izvestija RAN. Ser. biolog. 2007. № 2. S. 212–228.
6. Insarov G.Je., Borisova O.K., Korzuhin M.D., Kudejarov V.N., Minin A.A., Ol'chev A.V., Semenov S.M., Sirin A.A., Haruk V.I. Prirodnye jekosistemy sushi // Metody ocenki posledstvij izmenenija klimata dlja fizicheskikh i biologicheskikh sistem. M.: Rosgidromet, 2012. S. 190–265.
7. Kolomyc Je.G. Prognoz vlijanija global'nyh izmenenij klimata na landshaftnuju strukturu gor'noj strany // Izvestija AN SSSR. Ser. geogr. 1985. № 1. S. 14–30.
8. Kolomyc Je.G. Prognoznaja ocenka zonal'nyh landshaftno-jekologicheskikh uslovij v svete predstavljajushih global'nyh izmenenij klimata // Geografija i prirodnye resursy. 1999. № 3. S. 5–13.

9. Kolomyc Je.G. Regional'naja model' global'nyh izmenenij prirodnoj sredy. M.: Nauka, 2003. 371 s.
10. Kolomyc Je.G. Lokal'nye mehanizmy global'nyh izmenenij prirodnih jekosistem. M.: Nauka, 2008. 427 s.
11. Kornienko S.G. Ocenka transformacij prirodnih landshaftov Tazovskogo poluostrova po dan-nym kosmicheskoy s'emki // Geografija i prirodnye resursy. 2011. № 1. S. 67–73.
12. Kulik K.N. Agrolesomeliorativnoe kartografirovanie i fitojekologicheskaja ocenka aridnyh landshaftov. Volgograd: VNIALMI, 2004. 248 s.
13. Landshafty juga Vostochnoj Sibiri. Karta. M 1:1500000 / Red. O.P. Kosmakova, V.S. Miheev. M.: GUGK, 1977. 4 l.
14. Nazimova D.I. Polikarpov N.P. Vozmozen li prognoz lesnogo pokrova Sibiri na XXI vek? // Priroda. 2001. № 4. S. 55–62.
15. Prirodnye uslovija i estestvennye resursy SSSR. Predbajkal'e i Zabajkal'e / Otв. red. V.S. Preo-brazhenskij. M.: Nauka, 1965. 492 s.
16. Salugin A.N., Kulik K.N. Matematicheskie modeli dinamiki i prognoza jevoljucii aridnyh jeko-sistem. Volgograd: VNIALMI, 2006. 180 s.
17. Sochava V.B. Vvedenie v uchenie o geosistemah. Novosibirsk: Nauka, 1978. 318 s.
18. Frolov A.A. Prognoznnoe kartografirovanie izmenenij landshaftnoj struktury Pribajkal'ja pri poteplenii klimata // Geodezija i kartografija. 2010. № 9. S. 27–32.
19. Frolov A.A. Principy prognozirovanija geomnoj struktury Predbajkal'ja pri izmenenii klimata // Geografija i prirod. resursy. 2011. № 3. S. 133–141.
20. Frolov A.A., Cherkashin A.K. Kletochnye avtomaty – modeli jevoljucionnogo kartografirovani-ja landshaftov juga Vostochnoj Sibiri // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. Chast' I. Irkutsk.: ISJe SO RAN, 2007. S. 231–239.
21. Frolov A.A., Cherkashin A.K. Jevoljucionnoe geoinformacionnoe modelirovanie i kartografiro-vanie // Geodezija i kartografija. 2009. № 6. S. 40–45.
22. Hromyh V.V., Hromyh O.V. Ispol'zovanie GIS-tehnologij dlja izuchenija dinamiki dolinnyh landshaftov (na primere doliny Nizhnej Tomi) // Vestnik Tomskogo gos. un-ta. 2007. № 300-1. S. 230–233.
23. Cherkashin A.K. Estestvennaja klassifikacija geograficheskikh sistem: modeli predstavlenija znaniy // Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Nauki o Zemle. 2020. T. 31. S. 69–87.
24. Cherkashin A.K. Ierarhicheskaja klassifikacija geograficheskikh sistem // Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Nauki o Zemle. 2021. T. 35. S. 125–153.
25. Cherkashin A.K. Predmet geograficheskikh issledovanij: metateoreticheskij podhod // Izvestija RGO. 2022. T. 154. № 2. S. 1–19.
26. Cherkashin A.K. Klassifikacija geosistem: aksiomaticheskij podhod // Izvestija Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Nauki o Zemle. 2023. T. 43. S. 102–126.
27. Cherkashin A.K. Kvantovaja geografija: zadachi tipizacii, klassifikacii i rajonirovaniya // Izvesti-ja Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Nauki o Zemle. 2024. T. 47. S. 90–106.
28. Cherkashin A.K., Lesnyh S.I., Krasnoshtanova N.E. Geoinformacionnyj monitoring i matem-aticeskoe modelirovanie razvitiya pandemii koronavirusa COVID-19 // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. 2021. № 1 (21). S. 17–35.
29. Bittner T. Towards a Quantum Theory of Geographic Fields // 13th International Conference on Spatial Information Theory (COSIT 2017). Leibniz International Proceedings in Informat-ics. Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrumfür Informatik, Dagstuhl Publishing. 2017. Article № 5. P. 5:1–5:14.
30. Bittner T. Is there a quantum geography? // Tambassi, T. (eds), The Philosophy of GIS / Springer Geography. Springer Nature Switzerland AG. 2019. P. 209–239.

31. Cherkashin A.K. Polysystem Modelling of Geographical Processes and Phenomena in Nature and Society. Mathematical modelling of natural phenomena. 2009. Vol. 4. № 5. P. 4–20.
32. Cherkashin A.K., Lobycheva I.Yu. Earth Science Theoretical Models for Quantitative Analysis of Global Spatial Data // Geography and Natural Resources. 2020. Vol. 41. № 2. P. 123–132.
33. Elliott H.M. The Structure and Evolution of the Geographic System: a Study in Cultural Change. The University of Oklahoma, Ph.D. 1979. 455 p.
34. Elliott H.M. Cardinal Place Geometry // Geographical Analysis. 1985. № 17. P. 16–35.
35. Fischer M.M., Leung Y. (eds) Geo Computational Modelling: Techniques and Applications. Berlin, New York: Springer, 2001. 275 p.
36. Gessler P.E., Moore I.D., Mckenzie N.J., Ryan P.J. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes // International Journal of Geographical Information Science. 1995. Vol. 9. No 4. P. 421–432.
37. Harrison S.P., Prentice I.C., Barboni D., Kohfeld K.E., Ni J., Sutra J.-P. Ecophysiological and bioclimatic foundations for a global plant functional classification // Journal of Vegetation Science. 2010. Vol. 21. № 2. P. 300–317.
38. Iliev B.Z. Fiber bundle formulation of nonrelativistic quantum mechanics // Journal of Physics A: Mathematical and General. 2001. Vol. 34(23). P.4887–4918.
39. Mathian H., Sanders L. Spatio-temporal Approaches: Geographic Objects and Change Process. Wiley-ISTE. 2014. 176 p.
40. Phillips J.D. Landscape Evolution: Landforms, Ecosystems, and Soils. Elsevier Science. 2021. 356 p.
41. Shugart H.H., Crow T.R., Hett J.M. Forest succession models: a rational and methodology for modeling forest succession over large regions // Forest Science. 1973. Vol. 19. № 3. P. 203–212.
42. Vinogradov B.V., Cherkashin A.K., Gornov A.Yu., Kulik K.N. Dynamic monitoring of degradation and restoration of pastures in the Black Lands of Kalmykia // Problems of Desert Development. New York: Allerton Press, 1990. № 1. P. 7–14.