



Серия «Науки о Земле»
2024. Т. 47. С. 90–116
Онлайн-доступ к журналу:
<http://izvestiageo.isu.ru/>

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского
государственного
университета

Научная статья

УДК 911.5:130.121.2:51-7(571.53/.55)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.90>

Квантовая география: задачи типизации, классификации и районирования

А. К. Черкашин*

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

Аннотация. Обсуждается возможность применения математического аппарата квантовой теории информатики для моделирования географических явлений при решении задач типизации, классификации и районирования для объяснения причин целостности территориальных объектов. Используются методы тривиальных и главных расслоений дифференциальной геометрии и функционального анализа виртуальных внутренних пространств геосистем (геомеров и геохор). Отмечается, что преимущество квантового 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 холосистемной целостности в районах. Целостность объектов описывается уравнениями общего вида, которые не учитывают влияние географической среды, поэтому позволяют однотипно создавать модели разных геосистем. Для количественного анализа картографических данных применяются методы теории надежности, основанные на выявлении частотных распределений площадей геомеров по высоте и на расчете показателей надежности и безопасности. Применение идей квантовой геоинформатики продемонстрировано на примере оценки факторного влияния на облик ландшафтов по признакам территориального проявления фаций разных факторальных рядов (классов фаций) местностей хр. Малого Хамар-Дабана и высотного распределения геомов Прибайкалья и Забайкалья.

Ключевые слова: проблема целостности, квантовая теория, информационно-волновая функция, надежность и безопасность, Прибайкалье, Забайкалье.

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

Для цитирования: Черкашин А. К. Квантовая география: задачи типизации, классификации и районирования // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2024. Т. 47. С. 90–116. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.90>

Original article

Quantum Geography: Problems of Typification, Classification and Zoning

A. K. Cherkashin*

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

© Черкашин А. К., 2024

* Полные сведения об авторе см. на последней странице статьи.
For complete information about the author, see the last page of the article.

Abstract. The possibility of using the mathematical apparatus of the quantum theory of computer science for modeling geographical phenomena in solving problems of typification, classification and zoning to explain the reasons for the integrity of territorial objects is discussed. The methods of trivial and principal bundles of differential geometry and functional analysis of virtual internal spaces of geosystems (geomers and geochores) are used. The advantage of the quantum description lies in the linear simplicity of equations and formulas reflecting both the typical functions of discrete quantum states of geosystems and the superposition of these states realized in the observed spatial patterns in nature and society. This approach is the result of the ascent from a simple understanding of geographical objects as systems of continuous connection of elements to the allocation of independent discrete layers of independent functioning (geomers), their polysystem equivalence in geochores and holysystem integrity in region. The integrity of objects is described by general equations that do not take into account the influence of the geographical environment, therefore they allow creating models of different geosystems in the same way. For quantitative analysis of cartographic data, methods of reliability theory are used, based on the identification of frequency distributions of geomer areas by height, calculation of reliability and safety indicators. The application of the ideas of quantum geoinformatics is demonstrated by the example of assessing the factorial influence on the habitus of landscapes based on the signs of territorial manifestation of facies of different factorial series (facies classes) of the localities of the Maly Khamar-Daban ridge and the altitude distribution of the geomes of the Transbaikalia.

Keywords: integrity problem, quantum theory, information-wave function, reliability and safety, Nearbaikalia, Transbaikalia.

For citation: Cherkashin A.K. Quantum Geography: Problems of Typification, Classification and Zoning. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2024, vol. 47, pp. 90-116. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2024.47.90> (in Russian)

Введение

Почти полвека назад в 1975 г. на конференции «Моделирование элементарных геосистем» академик В. Б. Сочава [1975] определил основные задачи исследования в этой области для обоснования мероприятий по охране и оптимизации окружающей среды. Особое внимание обращалось на изучение элементарных геосистем и составляющих их биогеоценозов геотопологического уровня организации, естественно связанных с региональным масштабом сложных географических явлений. По его мнению, моделирование находится в сфере теоретической географии, требует абстрактного математического описания, создания особого математического аппарата, приемлемого для адекватного выражения географических закономерностей, установленных эмпирическим путем на полигон-трансектах стационаров и в ходе маршрутных и дистанционных исследований. К главным задачам отнесено выделение границ элементарных геосистем (геомеров) и создание модели геохоры. Эта модель оригинальна и не будет иметь аналогов в других науках, но принципы ее построения еще недостаточно разработаны. «Для создания такой модели необходима классификация элементарных геосистем по их функциональному значению в геохорах. Такого рода модели откроют новые перспективы в географии...» [Сочава, 1975, с. 6].

Осмысление результатов геотопологических работ на сибирских стационарах продемонстрировало, что геосистемам свойственна функциональная дифференциация природного пространства, в каждой части которого локализуются определенные объекты и процессы, необходимые для поддержания целостности геосистемы; они не совместимы на одном малом участке. Про-

странственные композиции взаимообусловленных фаций на местности – одно из важнейших проявлений результатов этой дифференциации [Крауклис, Дружинина, 1975]. Обычно при моделировании геосистема рассматривается как гомогенная взаимозависимость различных компонентов и их свойств; параметров, относящихся непосредственно к геосистеме как целостности, в моделях практически нет. В связи с этим выявление показателей и функций, выражающих эти целостные качества, и построение соответствующих математических моделей интеграции компонентов становятся основными задачами в области теоретического анализа и синтеза информации в географии [Крауклис, Дружинина, 1975].

Проблема выделения элементарных геосистем напрямую связана с двойственностью организации географического пространства – его непрерывности (континуальности) и прерывности (дискретности), наглядно наблюдаемых в растительном и почвенном покрове [Александрова, 1969; Whittaker, 1975], в структуре естественных [Преображенский, 1972] и общественных [Бакланов, 2010] образований на территории. Непрерывность выражается в плавности пространственного изменения характеристик объектов географической оболочки, а прерывность отражается в ее делимости на отдельные части – геосистемы, имеющие границы. Качество непрерывности, проявляющееся в сплошном изменении полей признаков и в разнообразии переходных по данным признакам форм, осложняет выделение естественных границ дискретных образований. Возникает проблема квантификации геосистем и их компонентов с учетом этих особенностей в физическом и признаковом пространстве, выявления элементарных частей объектов исследования.

В разных науках при моделировании элементарные системы часто сравниваются с химическими атомами и молекулами. Например, гетерогенные геосистемы (геохоры, полисистемы) представляются в виде своеобразных «молекул», где каждый «атом» (геомер, моносистема) соответствует гомогенной геосистеме нижележащего уровня [Сочава, 1965]. В работах Ф. Тённиса [2002] выделяются атомизированные индивиды, взаимоотношения которых порождают «молекулы» общественной жизни. В науке устанавливается связь между изначально автономными познавательными единицами – атомами или квантами теоретических знаний – в виде всеобъемлющей системы, призванной упорядочить весь универсум знаний [Солонин, 1996].

Б. Б. Родоман [Rodoman, 1965] считал, что для многократного хозяйственного районирования полезно иметь заранее выделенные «атомы территории» – мельчайшие земельные участки (природные фации и урочища, поля севооборота, городские кварталы и микрорайоны и др.), зафиксированные в виде единой государственной сетки географического районирования, что учитывает и природные, и экономические условия с тем, чтобы все прочие районы, необходимые для управления хозяйством, получались путем группировки или перегруппировки этих «атомов». Он показал возможность скачкообразно-дискретного компьютерного районирования быстро изменяющейся континуальной среды в процессе ее непрерывного мониторинга [Rodoman, 1965].

Районирование как выделение целостностей противостоит дифференциации – дроблению целого на однородные части [Гохман, Гуревич, Саушкин, 1968]. Компактные территориальные объекты (районы) образуют единство, т. е. различные компоненты природы, хозяйства и населения прочно связаны между собой, что ни одно из них невозможно ни убрать, ни изменить без того, чтобы на это не отреагировали другие компоненты и система в целом. Целостное образование нельзя свести к совокупности образующих его взаимосвязанных элементов – системы определенного типа: «каждое такое образование единственно в своем роде, неповторимо в своей определенности как данная целостность» [Гохман, Гуревич, Саушкин, 1968, с. 7]. Для ее описания предлагалось разработать «исчисление структур» в виде счетного бесконечномерного пространства независимых (ортогональных) элементарных составляющих (координат). Создание исчисления структур – одна из важнейших задач математической географии [Гохман, Гуревич, Саушкин, 1968].

Вместе с тем соответствующий математический аппарат (квантовая теория) давно существует и используется в квантовой физике при описании различных дискретно-квантовых систем и применяется при квантовых вычислениях, в квантовых компьютерных технологиях, квантовой информатике и др. [Килин, 1999; Preskill, 2020]. Речь идет о квантовой целостности, когда даже два разделенных пространством элемента образуют единое целое, демонстрируя явление запутанности (сцепленности) – некоторой внешне неуловимой мгновенной взаимозависимости. Теоретически запутанными могут быть любые элементы, поэтому это явление действует на всех масштабных уровнях.

Квантовые (К) компьютеры, основанные на К-явлениях дополненности, суперпозиции и запутанности, обеспечивают решение сложных задач намного быстрее самых современных суперкомпьютеров. В отличие от обычного К-компьютер оперирует не битами (0 или 1), а кубитами, имеющими одновременно с соответствующей вероятностью состояния и 0, и 1. К-система в каждый момент находится одновременно во всех базисных состояниях элементов, что называется «квантовой суперпозицией» состояний. К-состояния системы одномоментно обрабатываются унитарными К-операциями, что обеспечивает невероятное быстродействие и параллелизм вычислений [Килин, 1999]. Накопленные огромные массивы пространственно распределенных данных делают необходимым применение в географической науке средств искусственного интеллекта и квантовых технологий для создания постоянно изменяющегося целостного образа Земли [Тишков, 2022]. Обратившись к идеям квантовой физики, географы смогут разработать более совершенные способы описания и понимания социального пространства [Peterman, 1994]. Обсуждается возможность использования К-теории для моделирования географических полей в терминах расслоения пространства с учетом пространственной и качественной неопределенности [Bittner, 2017], для классификации и выделения границ географических районов [Bittner, 2019]. Критический обзор научных источников демонстрирует явный недостаток публикаций по этой теме [Smith, 2016].

Последние результаты, полученные в данном направлении [Черкашин, 2023], позволяют применять идеи квантования в географических исследованиях. Становится ясно, что давно поставленная в географии задача моделирования целостности территориальных образований [Гохман, Гуревич, Саушкин, 1968] требует серьезного подхода, и при ее решении необходимо не только принимать во внимание прежние и современные идеи географического знания, но и обсуждать вопросы методологического и математического порядка сложности.

Методологические основы исследования

По общему определению, целостность – внутреннее единство объекта, его относительная автономность, независимость от окружающей среды. В философии явление целостности изучается на основе холистического принципа, утверждающего, что целое больше суммы его частей, которые объединяются и организуются качеством целостности. Обращение географов к идее организации, по мнению А. А. Крауклиса [1977] – важный этап на пути восхождения от абстрактного к конкретному знанию для понимания, изучения и практического использования окружающей среды как целого. Подчеркивается географизм и средовая относительность земных явлений разного порядка – планетарной, региональной, локальной (топической) размерности.

Философия целостности Я. Смутсом [Smuts, 1936] названа холизмом и первично сформирована, исходя из идей биологического витализма и специальной теории относительности. Он трактовал целое как центральное понятие философии, синтезирующее в себе дуальные противоположности: объективное и субъективное, материальное и идеальное. Обоснование целостности объектов основывается на представлении о неразрывной связи целого и частей, о таком взаимодействии, которое снимает их существующее обособление и противопоставление [Абрамова, 1974]. По Я. Смутсу [Smits, 1936], целостность как органическая мировая реальность – нерасчленима и непознаваема через наблюдения. Примерами органической целостности являются живые организмы или человеческая личность, а также целостность природы и общества или государственная и территориальная целостность. Утрата целостности переводит объект в «разобранное» хаотическое состояние из автономных частей без объединяющего начала, что в итоге приводит к его перестройке или гибели.

Холистическая парадигма противостоит редукционистской, и несмотря на то, что исследования целостности часто связывают с системным подходом в науке, противостоит и классической системной парадигме. Появляется возможность конструированием из дробных элементов создать новый тип знания, а не вводить просто дополнительные систематизирующие приемы [Солонин, 1996]. Конструктивность предполагает наличие двух важнейших составляющих: первичных независимых элементов и принципов построения конструкции. Целое не содержит «механизмов» сочленения своих элементов, не имеет «швов» от их соединений [Солонин, 1996]. Точка зрения на целостность, альтернативная системной, заключается в том, что существуют объек-

ты, которые нельзя представить, как взаимодействующие между собой элементы. Эти объекты не имеют связанных частей и действуют в особом единстве [Костюк, 1993, с. 24].

Перечисленные суждения проиллюстрируем схемой (рис. 1), демонстрирующей противоположности и связи непрерывного и дискретного, целостного и системного мышления. Предполагается, что часть целого имеет структуру центрального, нуклеарного типа (слоя), названную А. Ю. Ретеюмом хорионом, и состоит из центра, эпицентра, ядра (концентра) и периферии – геополей, которые в реальном процессе раскрываются в прямом, а в познании – в обратном порядке от внешней непосредственно наблюдаемой оболочки к внутреннему центру (сущности). Содержательная основа центра упорядочивает свое окружение, состоящее из эпицентра устойчивого существования, ядра-аттрактора допустимой изменчивости и периферии распространения влияния. Воздействия ядер на смежные территории формируют непрерывные ландшафтно-географические поля [Солнцев, 2001; Николаев, 2006].

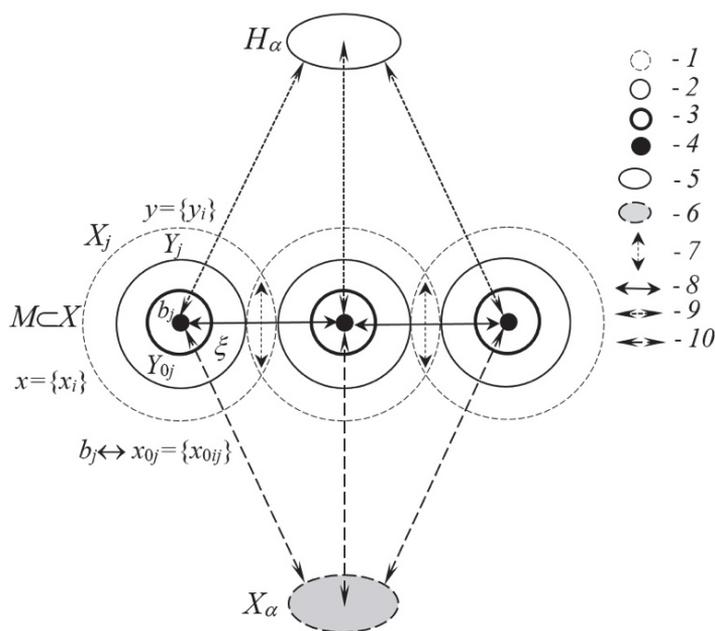


Рис. 1. Схема-модель организации территориальных объектов:

- 1 – положение системной проекции объекта в слое X_j (центр b_j и периферия); 2 – граница концентра (ядра) Y_j слоя X_j ; 3 – граница эпицентра Y_{0j} ядра Y_j слоя X_j ; 4 – положение центральной позиции b_j слоя X_j ; 5 – холоническая организация слоев H_α (холон); 6 – географическая среда X_α ; 7 – системная связь; 8 – полисистемная связь; 9 – холосистемная связь; 10 – метасистемная связь объекта и его среды

Периферия влияет на соседние геосистемы (хорионы) и формирует с перекрытием их характеристик непрерывные связи («швы») между территориальными объектами с превращением их в пространственные системы (гео-

поля) различного рода. Примерами таких связей могут быть динамические потоки твердого и растворенного вещества по склонам, распространение на территории растений и животных, транспортировка грузов и миграция населения. Эти процессы описываются соответствующими уравнениями сквозной интертеории динамических систем, общей для процессов в природе, хозяйстве и населении [Cherkashin, 2009].

Ядро хориона ограничивает количественную и качественную изменчивость параметров системы и на местности определяет границы геосистем в различной системной интерпретации, во-первых, в виде разорванного ареала однородных типологических единиц (геомеров) и, во-вторых, – границ компактной гетерогенной территории индивидуальных районов (геохор) [Сочава, 1978]. В терминах В. С. Преображенского [1972], это моносистемы и полисистемы: соответственно топическая модель геомера взаимосвязи природных компонентов в ландшафте и хорическая модель (геохора) организации геомеров. Ареал каждого геомера – изолированное дискретное замкнутое территориальное образование, не связанное через границу с соседними ареалами обычными системными связями. Их взаимодействие имеет информационный характер отображения, что в философии называется «тождеством противоположностей», а в географии исследуется сравнительно-географическими методами поиска различия, сродства и подобия структур и функций ареалов. Здесь реально геохора – это «молекула», состоящая из «атомов» геомеров [Сочава, 1965]. Из свойства полисистемности следует возможность проведения мета-анализа – приведения частных закономерностей к типовому виду.

В философии есть близкое молекулярному понятие «холон» – структура, которая является нечто целым и представляет собой часть еще большей целостности в холистической иерархии (холархии) от субатомных частиц до вселенной в целом. Основные идеи и правила холархии изложены в работах А. Кёстлера [Koestler, 1967] и К. Уилбера [Wilber, 1995]. Холон, по А. Кёстлеру [см.: Edwards, 2023], обладает уникальной идентичностью, состоит из частей и является частью более сложного целого.

Индивидуальный район (геохору) возможно рассматривать как систему и полисистему геомеров, но можно истолковывать как холон (холосистему), с одной стороны организующий геомеры, а с другой, – являющийся по иерархии частью геохоры большего масштаба. «Геохоры образуют иерархический ряд, состоящий из подчиненных гетерогенных, но цельных по структуре геосистем (микро-, мезо-, макрогеохора, район, округ, провинция и проч.)» [Сочава, 1978, с. 293]. Геохоры территориально включают все ниже лежащие по холархии геомеры, но в основном представлены геомерами соответствующего уровня: макрогеохора (ландшафт) – набором фаций, а физико-географическая область – типами природной среды.

Холон и холосистема – это не моносистема, не полисистема, а организующее начало отдельных моносистем (дискретных слоев, разобщенных элементов) с концентрической структурой хорионов, встречающихся во многих областях природы, экономики и общества, которые обязательно рассмат-

риваются «в чистом виде». Монослой – это изолированные модули, своеобразные «кирпичики», элементы мозаики, из которых собираются конструкции разного рода, в том числе со структурой целостности. В каждом монослое выделяются чистые сущности и универсальные законы строения и изменения, избавленные от давления обстоятельств своего проявления. Подчеркивается внутреннее единство слоя, его относительная автономность, независимость от других слоев и окружающей среды. Географическая среда трактуется как внешнее условие: наложение геосреды на параметры типичного монослоя позволяет отобразить местные особенности наблюдаемых объектов. В холосистеме части взаимодействуют с целым, но не между собой, так что холон является обязательной организующей надстройкой над частями, обеспечивающий единство (см. рис. 1). Геохолоны (районы, регионы), как и географическая среда, разновидности которой представлены разномасштабными геомерами, интегрируют одни и те же моносистемы (геомеры) и иерархически упорядочены в самостоятельные ряды геомеров и геохор [Сочава, 1978].

Монослой рассматривается как элемент К-системы целостности. Каждому элементу сопоставляется пара альтернативных, дуальных состояний типа зональных и а зональных качеств геосистем, коррелирующих с показателями серийности: коренные и серийные видоизмененные факторным влиянием состояния геосистем. В разных областях науки биполярные шкалы широко используются для формирования простейшего координатного пространства описания процессов и явлений. Например, построение индивидуальных или групповых семантических пространств Ч. Осгуда с координатами биполярных градуированных (трех-, пяти-, семибалльных) оценочных шкал, противоположные полюса которых заданы с помощью вербальных антонимов [Osgood, Suci, Tannenbaum, 1957]. При семантическом анализе понятий А. А. Любичев подыскивал каждому понятию противоположные по смыслу, получал антиномические пары, раскрывающие смысл понятий. Разработана фундаментальная шкала приоритетов сравнения явлений, указывающая предпочтение связанных с явлениями альтернатив [Saaty, 2001]. При экспертной оценке определяется, какое из двух сравниваемых явлений становится более важным в заданном целевом отношении. К. Уилбер [Wilber, 1997] предложил схему «четырех квадрантов» из векторов знаний о взаимно дополнительных областях развития: познавательная, поведенческая, культурная и социальная координаты. Каждый координатный вектор представлен последовательностью дискретных градаций (холонув), отражающих ступени эволюционного развития (стрелу времени), а также иерархию вложения холонув одной ступени в последующий по масштабу и сложности. Подробно рассматриваются бинарные отношения личности и общества, дополнительность их внешней и внутренней среды.

В информатике при координатном подходе простейшим вариантом кодирования становится биполярная градуированная двухбалльная оценочная шкала квантового исчисления $(-1, 1)$, или $(0, 1)$, где 0 соответствует коренному (точка отсчета), а 1 – измененному, серийному состоянию. Значениями

(0, 1) оцениваются альтернативные состояния типа «война и мир», «зима и лето», «далекий и близкий», «мертвый или живой», «безобразный или красивый», «позорный либо достойный» и т. д. в понятиях разных интертеорий. К-система состоит из элементов – N независимых координат, на которых элементы принимают К-значения 0 или 1, соответствующие паре К-состояний кубита $|0\rangle$ или $|1\rangle$ с определенной вероятностью. Запутанные состояния – положения в N -пространстве по нескольким двухуровневым К-элементам (координатам, кубитам). Например, при $N = 2$ это состояния $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$. К-система соответствует холосистеме, а холон – принципам организации К-состояний в виде К-операций. К-исчисление основано на таких принципах выделения и суперпозиции состояний и их запутанности.

Математические модели

Холистический подход предусматривает применение нескольких типов моделей К-систем: теоретико-множественная, геометрическая и алгебраическая модели. В информатике используется «система непересекающихся множеств» (СНМ) – это структура данных, которая управляет множеством элементов, разбитых на несколько непересекающихся подмножеств (см. рис. 1). Система выполняет операции по добавлению новых множеств, слиянию существующих множеств и определению, относятся ли элементы к одному и тому же множеству, что внешне соответствует формальным процедурам районирования с выделением контуров геомеров (фаций, групп и классов фаций, геомов) и геохор. На рис. 1 конечное множество X разбивается на пересекающиеся $\{X_j\}$ ($X_j \cap X_k \neq \emptyset$) и непересекающиеся $\{Y_j\}$ ($Y_j \cap Y_k = \emptyset$) подмножества $j \neq k$. Каждому подмножеству Y_j соответствует представитель $b_j \in Y_j \subset X_j$, вокруг которого собирается подмножество и используется для создания графов-деревьев, где вершины (узлы), соответствующие представителям, связаны линиями родственных отношений. Представитель b_j индексирует подмножество Y_j , определяет его название, и каждый элемент из Y_j содержит указатель на имя b_j подмножества Y_j , что реализуется в номенклатуре названий типов геомеров, например, указывается их принадлежность к типу природной среды: таежные, степные и т. д.

Для моделирования организации целостности удобно использовать графы-деревья с блочными структурами из СНМ (рис. 2) [Tarjan, Leuwep, 1984]. Вершины графа соответствуют холонам разного иерархического уровня, связанным с блоком элементов холосистемы (см. рис. 1, верхняя часть схемы). Все холоны и соответствующие холосистемы иерархически упорядочены по аналогии с векторами вложения знаний К. Уиблера [Wilber, 1997] или категорий таксонов разного ранга в классификации геохор [Сочава, 1978] (рис. 2, а). Классификация таксонов геохор и организация участков геохор на территории представлена разветвленной иерархической конструкцией (рис. 2, б), где функцию организации целостности выполняют корневые узлы подграфов-деревьев (холоны) по отношению к подчиненным геохорам или типам геохор. Горизонтальные связи между элементами геохор и холонами, представляющие геохоры, отсутствуют, что является особенностью формирования конструкций целостности без циклических и обратных связей.

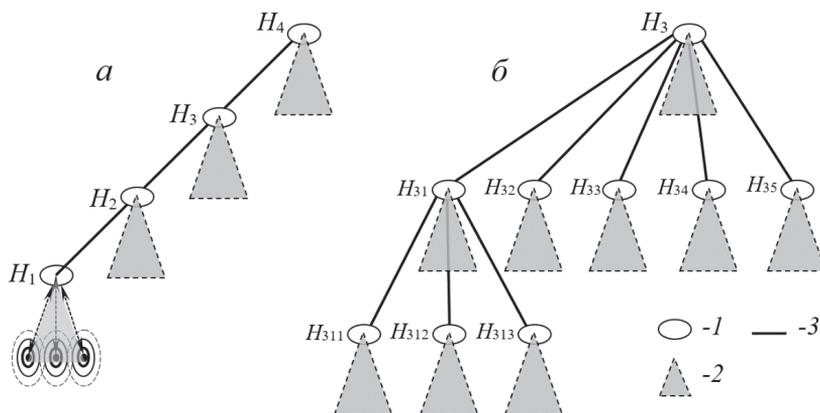


Рис. 2. Схемы организации холонов (геохор) по линейному порядку в их иерархии (а) и по иерархии группового подчинения (б): 1 – холоны H_α ; 2 – холосистемы; 3 – организующие влияния в квантовой геосистеме (холосистеме)

Организирующие связи сначала формализуются в терминах полисистемного расслоения [Cherkashin, 2009]. Расслоение – отображение $\pi: X \rightarrow B$ дискретного множества элементов $\xi \in X$ на счетное множество элементов $b_j \in B$ (см. рис. 1). Обратное отображение $\pi^{-1}: B \rightarrow X$ разделяет X на непересекающиеся подмножества (слои) $Y = \{Y_j\}$, покрывающие X . Тривиальное расслоение представляется в виде декартового произведения $Y = B \times Y_0$, где Y_0 – типовой (абстрактный) слой, похожий на остальные слои $Y_0 \leftrightarrow Y_j$, образец сравнения или подражания для всех слоев расслоения, каждый из которых связан со своим элементом базы $b_j \in B$. В полисистеме $Y = \{Y_j\}$ с таким свойством сравнения слоев $Y_j \leftrightarrow Y_j$ любой слой может быть выбран в качестве типового. Полисистемным расслоением является дифференциация (типизация) территории или ландшафтно-типологической карты на ареалы геомеров или геохор. На карте b_j – это таксономические позиции в легенде B . В качестве типового обычно выбираются коренные геомеры зонального типа. Структура связей типологических единиц $b_j \in B$ организует систему их классификации, например, в виде иерархии таксонов. Наглядной иллюстрацией процедуры расслоения и ее результатов является иерархическое расслоение на классы Y_j элементов $\xi \in Y_j$, где в классификациях элементами b_j базы расслоения B становятся таксоны более высокого порядка (см. рис. 2, б).

Для непрерывных множеств (пространств) реализуется касательное расслоение (X, M, π) над многообразиями M , основанное на идеях дифференциальной геометрии [Husemöller, 2013] $\pi: X \rightarrow M$, где X – многомерное пространство расслоения, M – база расслоения с непрерывной топологией; π – процедура расслоения; $Y = \{Y_j\}$ – расслоенное пространство непересекающихся касательных слоев. На ландшафтно-типологических картах таксономические слои Y_i расслоенного признакового пространства $Y = \{Y_i\} \subset X$

представлены непересекающимися контурами геомеров. Поверхность многообразия M описывается дифференцируемыми функциями $F(x)$ многих переменных $x = \{x_i\} \in X$ пространства X размерностью R^n . Предполагается, что системная функция $F(x)$ различается для систем различного рода, для которых по-разному понимаются координаты x_i , элементы ξ и их связи $F(x)$. Непрерывная функция $F(x)$ поверхности M позволяет решать аналитические задачи средствами дифференциальной геометрии. Каждый слой $Y_j(y)$ касается гладкой поверхности $F(x)$ в точке $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$, где $x_0 = \{x_{0j}\}$, $y = x - x_{0j}$, $y = \{y_i\}$ – локальная система координат слоя. Множество $F(x_0)$ – дискретная база расслоения на множество плоскостей $Y = \{Y_j\}$, касательных в точках с координатами $x_0 = \{x_{0j}\}$ – элементов $b_j \in B$ базы расслоения $B = F(x_0)$. В окрестности точек $F(x_0)$ и $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$ функция $F(x)$ с высокой точностью аппроксимируется в слое уравнениями [Черкашин, 2023]:

$$F(x) = f(y) + F(x_0), \quad (1)$$

$$f(y) = a \cdot y = \sum_{i=1}^n a_i y_i = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial y_i} y_i, \quad a_i = \frac{\partial f}{\partial y_i}, \quad f(y) = F(x) - F(x_0). \quad (2)$$

Первое уравнение отражает наложение характеристик географической среды $F(x_0)$ на универсальную интегрирующую билинейную функцию $f(y)$ относительных переменных y , описывающую отклонения локального состояния системы (в слое) под воздействием внутренних сил $D = ay$ (скалярное произведение векторов $y = \{y_i\}$ и $a = \{a_i\}$, a_i – коэффициенты чувствительности изменения функций $F(x)$ и $f(y)$ при единичном изменении переменных x_i и y_i). При статистической оценке коэффициентов a_i формулы $f(y) = a \cdot y$ (2) используются методы регрессионного и факторного анализа.

Процедуры расслоения над многообразиями позволяют перейти от непрерывного пространства географических характеристик $x = \{x_i\} \in X$ к дискретному множеству монослоев, соответствующих изолированным состояниям (типам) геосистем, индексируемых представителем типа b_j с параметрами центра слоя $x_{0j} = \{x_{0ij}\}$ (см. рис. 1). В общем виде такой подход реализован в концепции Х. Эверетта [Everett, 1957] множественности миров: существует бесконечное множество параллельных и равноправных копий физической реальности, в котором Ψ -функция описывает единый квантовый Мир в виде бесконечного числа возможных состояний. В процессе измерения он расслаивается на альтернативные проекции наблюдения, где допускаются независимые ветви единой Ψ -функции, описывающие не взаимодействующие миры. Все ветви Ψ -функции самостоятельно существуют и развиваются по пути, отличном от других ветвей. Когда измеряется одно из состояний, получается точный результат по этому состоянию, а не их сочетанию (суперпозиции). В географии мы имеем возможность со стороны наблюдать географические объекты в состоянии суперпозиции (геохоры) многих геомеров. Внутри конкретного геомерного ареала, абстрагируясь от его связи с окружением, возможно узнать только то, что происходит именно в этих границах, т. е. географически обусловлено.

На этапе расслоения задача квантования и объединения независимых слоев не решается. Для этого необходима «холоническая надстройка» над К-элементами (слоями) для формирования целостности (см. рис. 2, б). Для этого требуется перейти от простых (тривиальных) к главным расслоениям [Черкашин, 2023]. Здесь полезны процедуры геометрического квантования и методы теории групп. В результате удастся распространить методы квантования на более общие системы и пространства, основываясь на идее, что классическое и квантовое представления – это разные реализации одной и той же абстрактной схемы. Ее основной составляющей является алгебра наблюдаемых физических величин, представленных гладкими функциями $F(x)$ переменных значений координат $x = \{x_i\} \in X$ и пространством состояний $Y = \{Y_j\}$.

Продолжая логическую линию расслоения на многообразиях, рассматривается координатное пространство, где каждая координата пространства состояний $Y = \{Y_j\}$ представлена самостоятельным слоем j , его наблюдаемой функцией $f_j(y)$ и ее композицией $\psi_j = \psi[f_j(y)]$ – функцией-координатой виртуального гильбертова конечномерного функционального пространства H с теоретико-групповыми свойствами, когда сложение или произведение функций $\psi_j \in G$ дает функцию, принадлежащую к той же группе G . Обычно это комплекснозначные экспоненциальные Ψ -функции с групповыми свойствами умножения:

$$\psi_j \psi_k = \exp[iw_j f_j(y)] \exp[iw_k f_k(y)] = \exp\{i[w_j f_j(y) + w_k f_k(y)]\},$$

где i – мнимая (виртуальная) единица ($i^2 = -1$), w_j – собственные К-значения, кодирующие j -й слой одним или несколькими целыми числами.

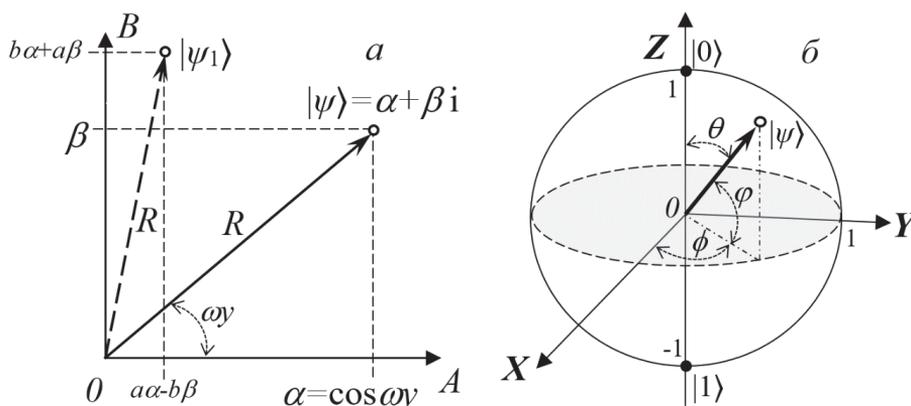


Рис. 3. Представление состояния квантовой системы $|\psi\rangle$ на комплексной плоскости (A, B) (а) и на единичной сфере Блоха в сферических координатах θ, ϕ, ϕ (б)

Современная К-наука описывает мир с помощью комплексных чисел $z = \alpha + \beta i$, где α, β – действительные величины. Ψ -функция $\psi(y) = \exp[i\omega y]$ преобразуется по формуле Эйлера $\psi(y) = \exp[i\omega y] = \cos \omega y + i \sin \omega y$, где ω –

частота колебания величины функции по переменной y ; $\alpha = \cos\omega y$, $\beta = \sin\omega y$; $\psi(0) = 1$, $\psi(\pi/2) = i$. Вследствие этого, комплексное число $z = \alpha + \beta i$ может быть представлено в виде радиус-вектора (столбца) $\mathbf{z} = [\alpha, \beta]$ на комплексной плоскости (A, B) в векторном базисе $(1, i)$ (рис. 3, а). Информационное состояние объекта может быть описано разными способами как компоненты вектора, комплексное число, комплексная функция или просто как символ-метка состояния $|\psi\rangle$ со значениями $|0\rangle$, $|1\rangle$ и др., что позволяет использовать математическую К-логику и аналитику при решении прикладных задач.

Функциональная надстройка $\psi_j = \psi[f_j(y)]$ над функцией слоя $f_j(y)$ с групповыми свойствами порождает главные расслоения с независимыми слоями $\psi_j(y)$, допускающими линейную суперпозицию двух или нескольких К-функций $\psi = c_j\psi_j + c_k\psi_k$, где c_j , c_k – произвольные комплексные числа с условием нормировки $|c_j|^2 + |c_k|^2 = 1$. Здесь $P_j = |c_j|^2$ и $P_k = |c_k|^2$ (квадраты модулей значений c_j , c_k) – вероятности обнаружить систему в независимых состояниях $|\psi_j\rangle$ и $|\psi_k\rangle$. Значения c_j соответствуют значениям координат К-системы в H -пространстве. Модуль определяет метрику – расстояние между точками в линейном комплексном пространстве. Суперпозиция $\psi(y)$ Ψ -функций $\psi_j(y)$ в H отражает виртуальную структуру (состав) изучаемой системы. Поскольку суперпозиция линейных суперпозиций является тоже суперпозицией, то К-системное описание становится также иерархической моделью. С помощью набора Ψ -функций осуществляется прямая модуляция (анализ, расслоение информации) наблюдаемых закономерностей $F(x)$. Обратная модуляция связана с расчетом квадрата модуля Ψ -функций (синтезом), приводящим к формуле целостности.

Для отражения преобразований и эволюции К-систем используются операторы и дифференциальные уравнения, решением которых является произведение временных и пространственных функций $\psi(t, y) = c\psi(t)\psi(y) = \exp(-i\omega t)\exp[i\beta(ay + x_0)]$, где a – волновой вектор; ω – частота колебания; x_0 – фазовое смещение, индивидуальное для каждой точки пространства (значение нормы, характеристика среды). Квантование возникает как особенность решения К-уравнений – задач на собственные числа, значения и функции, что в обратном порядке теоретически обосновывает существование дискретных слоев реальных пространств. Инвариантная структура К-системы отображается Ψ -функцией $\psi(y)$ от $y = (y_i)$, вид которой не меняется со временем t , например, геостационарное поле рельефа и подстилающих пород. Временная изменчивость $\psi(t) = \exp(-i\omega t)$ описывает цикличность и стабилизацию целостности, приближение ее к эталонной структуре $\exp[i\beta(ay)]$. Такие Ψ -функции определяются с точностью до общей фазы x_0 переменных $y = x - x_0$, что означает факт независимости этих функций от средового влияния, необходимой для формирования целостности. Иными словами, в разной географической среде объект как целое создается одинаковым образом и его изначальная генетическая основа, преформационная структура (ядра) мало изменяется со временем.

Вся информация о поведении К-объекта заложена в его волновой комплекснозначной Ψ -функции – векторе состояния. Вероятность нахождения объекта определяется квадратом модуля величины Ψ -функции в точке пространства и момент времени. Для определения Ψ -функции в физике используется уравнение Шредингера, а для географического моделирования это уравнение, как отмечал В. Б. Сочава [1975], необходимо выявить.

Ψ -функция $|\psi\rangle$, описывающая состояние кубита, может быть выражена в виде суперпозиции двух его базовых состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$: $|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$, $|c_0|^2 + |c_1|^2 = 1$. Один из наглядных способов визуализации – представление чистых состояний кубита в виде точек на сфере Блоха единичного радиуса [Nielsen, Chuang, 2010] в сферических или географических координатах широты $\varphi = 90^\circ - \theta$ и долготы ϕ местоположения. В этой биполярной системе северный полюс ($\varphi = 90^\circ$) соответствует чистому состоянию $|0\rangle$, южный полюс ($\varphi = -90^\circ$) – состоянию $|1\rangle$. Таким образом, исходное состояние К-системы одного кубита отображается двумя вещественными параметрами – широтой φ и долготой θ . Иными словами, любая простейшая (кубитовая) квантово-географическая ситуация и ее эволюция описываются как изменение положения на соответствующем «глобусе», а конкретное положение объекта и его смещение по поверхности Земли отражаются в преобразовании соответствующего кубита, например моделирующем перемещение магнитных полюсов Земли.

Состояние $|\psi\rangle$ (точка на поверхности сферы) определяется координатами H -пространства $c_0 = \cos(\theta/2)$, $c_1 = \exp(i\phi)\sin(\theta/2)$:

$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2)|0\rangle + \exp(i\phi)\sin(\theta/2)|1\rangle, \quad (3)$$

где $|c_0|^2 = |\cos(\theta/2)|^2 = \cos^2(\theta/2)$, $|c_1|^2 = |\exp(i\phi)\sin(\theta/2)|^2 = [\exp(i\phi)\exp(-i\phi)] \cdot \sin^2(\theta/2) = \sin^2(\theta/2)$ и $|c_0|^2 + |c_1|^2 = \cos^2(\theta/2) + \sin^2(\theta/2) = 1$. К-операции изменяют значение $|\psi\rangle$, наглядно переводят одну точку сферы в другую. На геосфере проявляются разные биполярные оппозиции в структуре и функции участков географической оболочки: выделяются континентальное и океаническое северное и южное полушария, северный и южный внетропические физико-географические пояса. Промежуточный тропический пояс можно рассматривать как суперпозицию (синтез) чистых состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$ первых двух.

Действие оператора на кубит определяется его воздействием на базисные векторы $|0\rangle$ и $|1\rangle$ ортонормированного базиса двумерного гильбертова пространства H , в котором любой вектор $|\psi\rangle$ этого пространства может быть разложен по базисным векторам: $|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$. В общем случае временная или иная изменчивость К-систем описывается унитарными операторами в H . При применении К-операций все коэффициенты суперпозиции К-состояний, что в виртуальной форме содержат реальную информацию, преобразуются одновременно как целое. На рис. 3, а действие $\Phi|\psi\rangle$ унитарного оператора умножения $\Phi = a + bi$ ($a^2 + b^2 = 1$) выражается в повороте вектора $|\psi\rangle = \alpha + \beta i$ ($\alpha^2 + \beta^2 = R^2 = \text{const}$) вокруг начала координат 0 с сохранением его длины R :

$$\begin{aligned} \Phi|\psi\rangle &= (a + bi)(\alpha + \beta i) = a\alpha - b\beta + (b\alpha + a\beta)i, \\ (-\alpha - b\beta)^2 + (b\alpha + a\beta)^2 &= (a^2 + b^2)(\alpha^2 + \beta^2) = (\alpha^2 + \beta^2) = R^2. \end{aligned}$$

Географические приложения

Математика квантовой теории является частью функционального анализа и может быть без привязки к физике явлений использована для описания целостности различных объектов. Проиллюстрируем это на примере оценки факторного влияния на облик ландшафтов по признакам территориального проявления (площади) фаций разных факторальных рядов (классов фаций) и высотного распределения геомов.

Сравнительная оценка факторного воздействия проводилась для геосистем хребта Малый Хамар-Дабан (Западное Забайкалье) (рис. 4).

Территория расположена на широком выположенном водоразделе и включает части бассейнов р. Темник на северном макросклоне хребта (район оз. Таглей) и р. Торей на южном макросклоне. На плоских водоразделах, северных склонах возвышенностей и в верховьях рек распространена елово-кедрово-лиственничная тайга. По южным склонам возвышенностей и в нижних частях долин встречаются степи и лиственничные лесостепи [Черкашин, Фролов, 2023]. Ландшафтно-типологическая ГИС-карта создавалась по алгоритму СНМ на основе материалов космической съемки и маршрутных описаний выделов фаций (БГЦ) с операциями разграничения элементов множеств (контуров БГЦ), слияния контуров и группы контуров в границах фаций, групп и классов фаций по критерию отнесения элементов к одному и тому же множеству (геомеру). В результате на карте территория разбивается на несколько таких непересекающихся множеств (см. рис. 1). При анализе ландшафтной структуры в качестве критериев отнесения учитывались ландшафтообразующие факторы и их сочетания, формирующие фации нескольких факторально-динамических рядов (классов фаций): **1** – субгидролитоморфный; **2** – сублитоморфный; **3** – ксеролитоморфный; **4** – субгидроморфный. Фации с меткой **1** находятся на плоских водоразделах и приводораздельных территориях, выровненных возвышенных участках. Фации класса **2** формируются на крутых склонах в основном северных экспозиций с неглубоким залеганием материнских горных пород. Фации ряда **3** встречаются на крутых сухих склонах преимущественно южных экспозиций на каменистых почвах. Фации класса **4** распространены по долинам рек, ручьев, межгорным и водосборным понижениям, на заболоченных участках.

В ландшафте ареалы групп фаций по фациальному составу объединяются в целостные геомерные конструкции в виде геохор субрегиональной размерности – урочища и местности: плакоры, пологие и крутые склоны, верховья и долины рек, озерные котловины. Простая организация пространства территории обеспечивается взаимоположением точек водоразделов и тальвегов водотоков. В границах урочищ и местностей встречаются фации разных групп и классов, сочетание которых подчеркивает неоднородность ландшафтов.



Рис. 4. Наблюдаемые местности горнотаежного ландшафта окрестностей оз. Таглей на хребте Малый Хамар-Дабан: куполообразные приводораздельные поверхности (A), крутые склоны преимущественно северной (B) и южной (C) экспозиции, верховья (D) и долины (E) рек, озерные котловины (G). Классы фаций – факторальные ряды: 1 – субгидролитоморфный; 2 – сублитоморфный; 3 – ксеролитоморфный; 4 – субгидроморфный. Границы: 5 – выделов фаций (БГЦ), объединенных в геомеры и геохоры; 6 – местностей [Черкашин, Фролов, 2023]

Пространственная системная связность ареалов классов фаций отражается в признаках соседства, указывающих на то, как часто при горизонтальном и вертикальном сканировании карты участок одного типа i через границу переходит в участок другого типа j или сохраняет свою типологическую принадлежность ($i \rightarrow i$) внутри контура. Связи отражаются в матрице соседства, из которой видно, что ареалы класса фаций **1** оказывают наибольшее влияние на окружающие геосистемы [Черкашин, Фролов, 2023].

Подобие в полисистеме геомеров уровня класса фаций в ландшафте отображается в матрице сравнения, элементы которой соответствуют коэффициентам возможного замещения фаций одного класса фациями других классов $i \rightarrow j$; коэффициенты рассчитываются по формуле $a_{ij} = s_i / s_j$, где s_i, s_j – вероятности обнаружения-встречаемости, а именно доли площади фаций i и j -го классов на карте территории [Черкашин, Фролов, 2023]. Минимальное значение суммы a_{ij} ($i \neq j$) указывает на доминирующий класс фаций **1** – геомерный слой, который можно принять за типовой, наиболее близкий к фациям зональной нормы. Значения долей указаны в ландшафтной формуле **S** (векторной сумме) при символах соответствующих классов **1–4**:

$$S = 0,32 \cdot 1 + 0,20 \cdot 2 + 0,23 \cdot 3 + 0,25 \cdot 4. \quad (4)$$

Выражение (4) отражает простейший вариант суперпозиции слоев или независимых геополей, которые, по мнению В. А. Николаева «структурируют единую ландшафтную оболочку... не вырывая из системного целого отдельные составляющие, а наделяя это целое структурным многообразием» [Николаев, 2006, с. 7].

При К-описании целостности территории реализуется иной подход. Исследуется не просто набор взаимосвязанных фаций, а холосистема независимых элементов (монослоев геомеров), объединенных в К-организацию. Перечисленные ряды **1–4** соответствуют двум координатам факторального признакового пространства, для каждой из которых определяются двухуровневые кубиты альтернативных значений геосистемного качества – К-состояния «поверхностное $|0\rangle$ и глубокое $|1\rangle$ » залегание материнских пород (литогенный фактор) и «недостаточное $|0\rangle$ и избыточное $|1\rangle$ » увлажнение (гидрогенный фактор). Эти качества отражают глобальную и региональную оппозицию континентальной и океанической сфер, горных и равнинных территорий. Приставка «суб» означает, что влияние соответствующих факторов в характеристиках геосистем проявляется не полностью, экранируется осадочным, почвенным и растительным покровом. Факторы влияния и их качественное проявление ранжируются по их важности в формировании облика ландшафта. Н. А. Солнцев [2001] справедливо считал ведущим литогенный фактор, определяющий основные и начальные свойства наземных геосистем, выраженные в рельефе и сохраняющиеся в процессе исторического формирования ландшафтов.

Квантовые системы отличаются от классических свойствами дополненности и сцепленности (запутанности). Дополненность выражается в наличии у системы разных, взаимно исключающих качеств, сосуществующих

щих вместе, но оцениваемых по-отдельности. Сцепленная система представляет собой неразделимое целое из сторон (координат), когда одна сторона не может быть полностью описана без учета другой; примеры – широтно-зональная, межкомпонентная и высотно-ярусная запутанность. Факторальные ряды точнее моделируются не чистыми, а сцепленными состояниями: 1) субгидролитоморфное $|01\rangle$; 2) сублитоморфное $|10\rangle$; 3) ксеролитоморфное $|00\rangle$; 4) субгидроморфное $|11\rangle$. На первой позиции указаны сублитоморфное, на второй – субгидроморфное качество. Суперпозиция (линейная комбинация) векторов-состояний задает смешанное состояние $|\psi\rangle$ по формуле:

$$|\psi\rangle = 0,57|01\rangle + 0,45|10\rangle + 0,47|00\rangle + 0,50|11\rangle, \quad (5)$$

где коэффициенты c_{ij} при символах состояний $|ij\rangle$, например, 0,57 при $|01\rangle$, 0,47 при $|00\rangle$ – это амплитуды вероятности $P_{ij} = (c_{ij})^2$, которые вначале практически оцениваются $c_{ij} = \sqrt{s_{ij}}$ по доле площади s_{ij} ареалов совместного проявления в ландшафтах вариантов i и j факторальных рядов.

Состояния группируются по свойствам факторальности: сублитоморфные фации объединяются по второй нулевой позиции в состояниях $|00\rangle$ и $|10\rangle$ с присвоением символа $|0\rangle$, субгидроморфные фации группируются по второй единичной позиции в состояниях $|11\rangle$ и $|01\rangle$ с присвоением символа $|1\rangle$. Смешанное состояние в данном случае $|\psi\rangle = 0,66|0\rangle + 0,75|1\rangle$ при $|0\rangle = 0,69|10\rangle + 0,72|00\rangle$, $|1\rangle = 0,75|01\rangle + 0,66|11\rangle$. Состояние $|\psi\rangle$ согласно (3) можно представить на «глобусе» исследуемого ландшафта (сфере Блоха), приняв $\cos(\theta/2) = 0,66$, откуда $\arccos(0,66) = 0,85$, т. е. $\theta = 0,85 \cdot 180 \cdot 2/\pi = 97,4^\circ$, или $\varphi = 90^\circ - 97,4^\circ = -7,4^\circ$ южной широты. Долгота ϕ находится из соотношения $\exp(i\phi) = \cos\phi + i\sin\phi = 1$, т. е. $\cos(\phi) = 1$ и $\phi = \pi j$, что при $j = 0$ определяет положение нулевого меридиана, где перемещается точка по широте φ .

Начальные представления о виде Ψ -функции можно получить при анализе высотного распределения геомеров ранга геомов. С использованием ГИС-карты «Ландшафты юга Восточной Сибири» (М 1:1 500 000) и цифровой карты рельефа определялось распределение площади ареалов геомов по высотному градиенту (ярусу, поясу) с шагом 100 м в ландшафтном окружении оз. Байкал [Черкашин, Солодянкина, 2011].

Выделено 19 градаций высоты (от 0 до 2000 м, от уреза воды оз. Байкал) для 29 встречающихся на территории геомов – от высокогорных гольцово-альпийнотипных (символ кода **I** в легенде) и гольцово-тундровых (**II**) до подгорных подтаежных сосново-лиственничных (**XXI**, **XXXII**) и лугово-степных равнинных (**XXXIII**). По площади преобладают горнотаежные лиственничные (**IX**), а также темнохвойные ограниченного развития (**XV**) и горнотаежные сосновые (**XX**) леса. Данные сведены в таблицу и построены колоколообразные кривые распределения площадей геомов по высоте (рис. 5, а). Модальное положение максимумов кривых различается, но смещением графиков при центрировании, нормировании и логарифмировании данных кривые почти совпадают, выделяя общую закономерность, что вы-

ражена универсальной формулой [Черкашин, Солодянкина, 2011]. Этот результат доказывает, что при мета-анализе данных имеется возможность избавиться от среднего влияния, перейдя в уравнениях (1)–(2) к относительным показателям тривиального и главного расслоения.

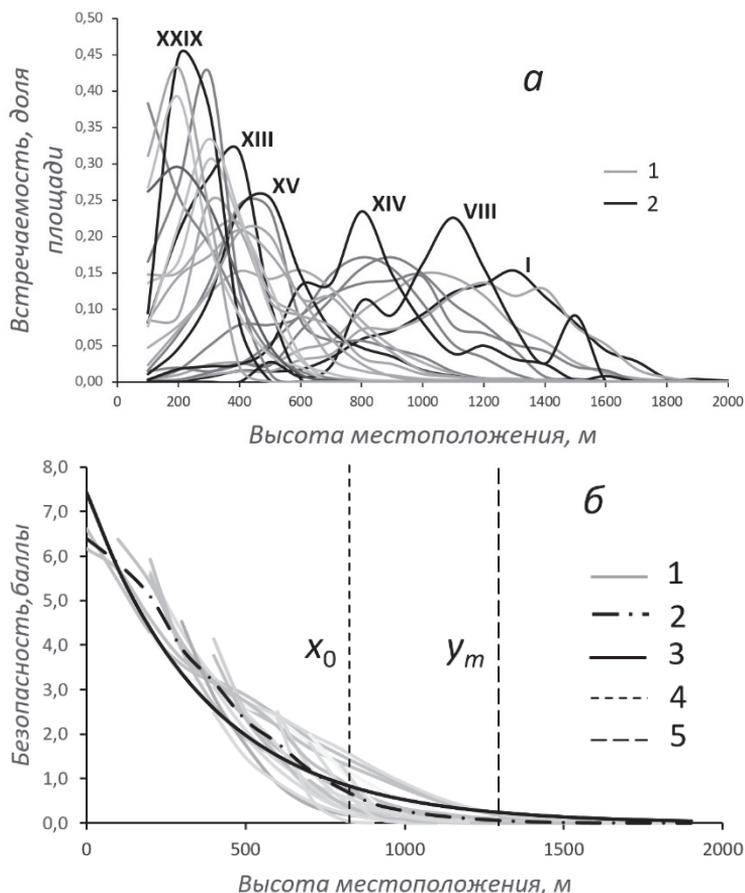


Рис. 5. Наблюдаемые на территории Прибайкалья и Забайкалья геосистемные закономерности: а) распределение площади геомов по высоте (встречаемость в долях от общей площади ареалов каждого геомы); выделены кривые распределения для геомов: **I** – гольцовые альпинотипные; **VIII** – межгорных понижений и долин таежные темнохвойные редуцированного развития; **XIII** – подгорные подтаежные лиственничные; **XIV** – горнотаежные темнохвойные редуцированного развития; **XV** – горнотаежные темнохвойные ограниченного развития; **XXIX** – южнотаежные темнохвойные возвышенностей. Кривые: **1** – распределения площади различных геомов по грациям высоты местоположения (с шагом 100 м); **2** – распределения выделенных геомов с меткой геомы в легенде карты «Ландшафты юга Восточной Сибири»; б) совмещенные по модальным значениям кривые безопасности реализации геосистемных процессов. Кривые: **1** – величина безопасности для условий различных геомов; **2** – средние значения безопасности в структуре высотной поясности; **3** – аппроксимирующая кривая безопасности, рассчитанная как экспоненциальная функция высоты местоположения; **4** – положение модальной высоты $x_0 = 800$ м при совмещении кривых; **5** – положение предельной высоты y_m для совмещенных кривых

Ландшафтная формула рассматриваемой территории Прибайкалья и Забайкалья задается векторной суммой вида (4) $S = s_1 \cdot \mathbf{I} + s_2 \cdot \mathbf{II} + s_3 \cdot \mathbf{III} + s_4 \cdot \mathbf{IV} + \dots$ с указанием встречаемости s_j при символах геомов \mathbf{j} (**I–XXXVII**) типа или К-формулой вида (5) $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle + c_3|\psi_3\rangle + \dots$ с коэффициентами амплитуды c_j вероятности состояний геомов $|\psi_j\rangle$, определяемых Ψ -функциями, которые необходимо выявить. Для этого используются частотные распределения $P_j(x)$ площади геомов по грациям высоты x с шагом $\Delta x = 100$ м (см. рис. 5, а). Соответствующие наблюдаемые эмпирические кривые предлагается обрабатывать средствами теории надежности, изучающей количественные закономерности распределения отказов систем выполнять свои функции и причины их возникновения, например, уменьшения продукционной активности биоты с высотой x местоположения в структуре высотной пояности или снижение встречаемости разного типа геомов с высотой. В качестве наблюдаемой величины используется возрастающая функция накопления отказов (функция распределения) $F(x)$, связанная с другими функциями надежности соотношениями:

$$P(x) = dF/dx, E(x) = -\ln F(x), p(x) = -dE/dx, \quad (6)$$

где $P(x)$ – плотность (распределение) отказов по ярусам (см. рис. 3, а); $E(x)$ – безопасность функционирования (см. рис. 3, б) в зависимости от высоты местоположения x ; $p(x)$ – интенсивность отказа, соответствующая риску невыполнения геосистемных функций. Безопасность $E(x)$ – это безразмерная стохастическая величина, исчисляемая в баллах и равная $E(0) = 1$. Функция $F(x)$ вычисляется как сумма по высоте значений распределения $P(x)$. Затем по формулам (6) находится величина безопасности $E(x)$, которая снижается с высотой, и величина риска $p(x) = -\Delta E / \Delta x$, где ΔE – понижение безопасности при переходе вверх от одного высотного яруса Δx к другому.

По правилам главного расслоения К-функции $\psi_j = \psi[f_j(y)]$ над $f_j(y)$ должны обладать групповыми свойствами – в данном случае быть экспонентами общего вида

$$\psi(y) = \exp[(\alpha + \beta i)y] = \exp(\alpha y)\exp(i\beta y) = \exp(\alpha y)[\cos(\beta y) + i\sin(\beta y)], \quad (7)$$

где $f(y) = (\alpha + \beta i)y$, $y = x - x_0$ – величина, смещенная относительно модального значения высоты x_0 , соответствующего максимуму величины плотности распределения $P(x)$ для каждого j -го геоба ($P_j(y) = P(x - x_{0j})$). Наблюдаемая встречаемость в этом случае равна $S(y) = |\psi_j(y)|^2 = \exp(2\alpha y)$. В кубитовых координатах на сфере (3) выражение (7) переписывается так: $|\psi(y)\rangle = \exp(\alpha y)[\cos(\beta y)|0\rangle + i\sin(\beta y)|1\rangle]$, где $\theta = 2\beta y$ и принимается $\exp(i\phi) = i$, т. е. $\phi = \pm\pi/2$, или $\pm 90^\circ$ относительно нулевого меридиана $\phi = 0$. Состояние системы перемещается по одному из выделенных меридианов, отклоняясь от «северного полюса» (состояния $|0\rangle$) на величину $\theta = (\beta y/\pi) \cdot 360^\circ$.

Для аппроксимации $F(x)$ и $P(x)$ удобно использовать функцию Гумбеля распределения экстремальных значений $F(x) = \exp[-\exp(-\gamma y)]$, для которой безопасность $E(y) = \exp(-\gamma y)$ является снижающейся экспонентой (см. рис. 5, б).

Кривые функций безопасности в слое $E_j(x)$ можно совместить, отождествив с одной типовой кривой тематического слоя, например, с $x_0 = 800$ м, что соответствует горнотаежным геомам лиственничных и темнохвойных лесов редуцированного развития (типы VI и XIV). Получается, что Ψ -функцией квантово-географической территориальной системы является Ψ -функция безопасности геосистемного функционирования по разным серийным факторам, в частности, по фактору высотного положения. Остальные показатели надежности рассчитываются на основе функции безопасности по соотношениям (6).

Осредненная кривая безопасности (см. рис. 5, б) аппроксимируется с коэффициентом корреляции $r = -0,98$ соотношением

$$E(y) = |\psi(y)|^2 = \exp(2\alpha y) = \exp(2,00 - 0,00265x) = \exp[-0,00265(x - 800)] = \exp(-0,00265y), \quad (8)$$

откуда $\gamma = 0,00265$, $2\alpha = -0,00265$, $\alpha = -0,00133$ 1/м. Тем самым вычисляется значение вещественной константы α для Ψ -функции (7). Константа β определяется на основании свойств дифференциального К-оператора, наблюдаемые значения которого квантованы и соответствуют действительным собственным значениям и функциям этого оператора [Черкашин, 2023]. Для операторов дифференцирования m -го порядка для функций вида (7) это означает $d^m\psi(y) / dy^m = k\psi(y)$, где k – определяемое собственное значение (действительная, не мнимая величина). Подставляем сюда функцию (7) и получаем

$$d^m\psi(y) / dy^m = (\alpha + \beta i)^m \exp[(\alpha + \beta i)y] = k\psi(y), \quad k = (\alpha + \beta i)^m. \quad (9)$$

Значение k будет действительным только в некоторых случаях. При этом требуется, чтобы Ψ -функция была комплексной, т. е. $\alpha \neq 0$ и $\beta \neq 0$. Это возможно при $m = 3$, когда $\beta = \pm\sqrt{3}\alpha \approx \pm 1,73\alpha$, $k = -8\alpha^3$, и при $m = 4$, когда $\beta = \pm\alpha$ и $k = -4\alpha^4$, поэтому вид Ψ -функции можно определить по тому, насколько коэффициент β по абсолютному значению близок к величине α .

Расчет значения β основан на особенностях решения дифференциального уравнения (9) с учетом граничных условий $\psi(y) = \psi(0) = \psi_0$, $\psi(y) = \psi(y_m) = \psi_m = 0$ на интервале высоты $[0, y_m]$. При этих условиях уравнение (7) принимает вид $\psi(y) = \psi_0 \exp(\alpha y) \cos(\beta y)$, откуда

$$E(y) = |\psi(y)|^2 = \psi_0^2 \exp(2\alpha y) \cos^2(\beta y), \quad (10)$$

где $\psi_0^2 = 1,21$, $\beta = \pi/(2y_m)$ – частота колебания Ψ -функции по высоте; y_m – предельное значение высоты местоположения, когда величина безопасности (10) близка к нулю. По данным (см. рис. 5, б) это высота примерно $y_m \approx 1200$ м, откуда $\beta = \pi/(2y_m) = 0,00121$ – значение, сопоставимое с $|\alpha| = 0,00133$ 1/м, которая дает $y_m = -\pi/(2\alpha) = 1185,5$ м. Отсюда заключаем, что $\beta \approx \pm\alpha$ и $m = 4$, следовательно, согласно (9), искомое дифференциальное уравнение:

$$d^4\psi(y) / dy^4 = -4\alpha^4\psi(y). \quad (11)$$

Функция безопасности $E(y)$ описывается уравнением (10), которое учитывает снижение $E(y)$ с высотой и периодические отклонения от основной тенденции (см. рис. 5, б).

Уравнения (7) К-теории обладают преимуществом простоты оперирования с понятиями и формулами. Они имеют общую структуру, благодаря чему сравнимы при смещении значений относительных переменных y . Смещение обеспечивается умножением Ψ -функций на оператор вида $\Delta\psi(y) = \exp[(\alpha + \beta i)y_0]$: $\Delta\psi(y)\psi(y) = \exp[(\alpha + \beta i)(y + y_0)]$. Здесь $y + y_0 = (x - x_0 + y_0) = (x + y_0) - x_0 = x - (x_0 - y_0)$, т. е. перемещается либо собственно высотная характеристика $(x + y_0)$, например, при потеплении климата, или характеристика среды $(x_0 - y_0)$, что означает эволюционный переход (замещение) геомов одного типа другим. Равенство $\cos(\beta y_m) = 0$ имеет не только один упомянутый корень $\beta y_m = \pi/2$, а спектр дискретных корней $\beta_j y_m = \pi/2 + \pi j$, где j – собственные числа, кодирующие классификационные позиции [Черкашин, 2023].

Время t в уравнение (7) в К-теории также вводится как мультипликативная поправка $\varphi(t)$ – функция $\varphi(t) = \exp[v(\alpha + \beta i)t]$, в реальности отражающая временные тенденции и циклы, например географические циклы рельефа:

$$\psi(t,y) = \varphi(t)\psi(y) = \exp[\pm v(\alpha + \beta i)t]\exp[(\alpha + \beta i)y], \beta = \pm\alpha, \quad (12)$$

где v – параметр эволюции рельефа (м/млн лет), смысл которого раскрывается в специальных моделях [Бызов, Саньков, 2015]. Такая Ψ -функция удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$2i\partial^2\psi(t,y) / \partial t^2 = (v/\alpha)^2\partial^4\psi(t,y) / \partial y^4, \quad (13)$$

решения которого (13) различаются по собственным значениям α . При большем числе независимых переменных y уравнение (13) принимает вид $2i(\alpha/v)^2\partial^2\psi(t,y) / \partial t^2 = \Delta^2\psi(t,y)$, где Δ – векторный оператор Лапласа, в данном случае $\Delta^2 = -4\alpha^4$. Это одно общее уравнение для всех переменных состояний геосистем.

Выражения $|\psi_j(t,y)\rangle$ (12) при разных α_j формируют систему независимых координат функционального пространства – множества независимых Ψ -функций, квадрат модуля $|\psi(t,y)|^2$ которых соответствует функции безопасности $E(t,y)$ проявления геомов по временной и пространственной переменной. Единство К-состояний выражается ландшафтной формулой вида (5) – суперпозицией состояний $|\psi_j(t,y)\rangle$ с амплитудами вероятности c_j , квадрат модуля которых $s_j = |c_j|^2$ соответствует вероятности s_j обнаружить на территории j -й геом. Территориальная целостность как реальность оценивается по квадрату модуля суперпозиции соответствующих Ψ -функций $\psi_j(t,y)$ вида (4) с весовыми коэффициентами s_j , что указывает на долю площади территории, которую занимает данный геом в конкретном высотном поясе. Характеристики географической среды x_0 скрыто присутствуют в составе Ψ -функций и могут быть учтены при расчетах кривых распределений $P(x)$ и надежности

$F(x)$ по формулам (6), соответствующим высотному распространению различных геомов (см. рис. 5, а).

Выводы

Математическая К-теория рассматривается как одно из важнейших направлений функционального анализа – описания координатного пространства функций и их преобразования. Координаты этого пространства формируются по процедуре тривиального и главного расщепления наблюдаемых функций одного или множества относительных переменных; в каждом слое определяются интегрирующие билинейные функции действительных и их экспоненциальные аналоги комплексных переменных. Географические объекты описываются в реальном пространстве факторальных координат и в пространстве виртуальных состояний и их Ψ -функций, отражающих соответственно внешние наблюдаемые и внутренние скрытые особенности геосистем. Преимущество К-моделирования выражается в простоте описания состояний с использованием линейных и теоретико-групповых операторных преобразований, переводящих одни элементы функционального пространства в другие элементы этого же пространства с учетом временной изменчивости. Это дает возможность наглядно в рамках К-географии решать задачи типизации, классификации и районирования как разных способов организации дискретных объектов (геомеров) в целостные территориальные (геохоры) и информационные (типы, классы) объединения. Существует географическая интерпретация состояний кубита, отражающего альтернативные направления изменчивости. В зависимости от особенностей решаемой задачи состояние геосистемы записывается в кубитовых координатах на сфере или выражается комплексными величинами и экспоненциальными функциями комплексной переменной. Суперпозиция состояний осуществляется с учетом реальной вероятности (встречаемости) и виртуальных амплитуд вероятности.

В К-географии необходимо учитывать различия уровней сложности системной интерпретации объектов: элементы, системы, моносистемы, метасистемы, полисистемы, холосистемы. Элементы – это слои функций многообразия реальности, объединенные между собой непрерывными связями. Моносистемы выделяются как ядра независимых слоев (геомеров) посредством типологизации объектов в пространстве признаков. Положением в пространстве координат типов геомеров задается территориальная пространственная структура ландшафтов в показателях встречаемости. В полисистеме слои отождествляются как противоположные сущности, функционально сравниваются и объединяются в геокомплексы. В холосистеме слои трактуются как К-состояния независимых частей (слоев), суперпозиция которых определяет состояние системы в целом в виртуальном пространстве. Целостность рассчитывается как обратная модуляция через квадрат модуля состояния геохоры – суперпозиции состояния слагающих геомеров. Целостность объектов не зависит от географической среды, хотя в расчетах может учитываться, что порождает разнообразие моделей геосистем. В К-географии все модели описываются дифференциальным уравнением общего вида.

Для количественного анализа картографических данных применяются методы теории надежности, основанные на выделении частотных распределений площадей геомеров по высоте, на расчете показателей надежности и безопасности. Безопасность становится основной функцией в теории К-географии, виртуальный аналог которой является решением общего уравнения с учетом временной изменчивости – результата действия операторов эволюционных преобразований. Посредством мета-анализа с сопоставлением модальных значений распределений, кривые безопасности разных геомов приводятся к единой закономерности (сравнимы как противоположности).

К-теория в ее расширенном понимании – новый способ описания реальности и решения практических задач в географии. Обсуждаемые результаты представляют собой вариант начального применения этой теории для моделирования структур целостности геосистем. Есть множество других примеров, которые могут быть проинтерпретированы в терминах К-геоинформатики. Разнообразие направлений и средств функционального анализа позволит в дальнейшем разработать новые методы моделирования сложных географических явлений, адекватно отразить знания о строении и изменении геосистем как целостных образований.

Список литературы

- Абрамова Н. Т.* Целостность и управление. М. : Наука, 1974. 248 с.
- Александрова В. Д.* Классификация растительности. Обзор принципов классификации и классификационных систем в различных геоботанических школах. Л. : Наука, 1969. 275 с.
- Бакланов П. Я.* Структуризация географического пространства – основа теоретической географии // Теория социально-экономической географии: современное состояние и перспективы развития. Ростов-на-Дону : Изд-во ЮФУ, 2010. С. 12–20.
- Бызов Л. М., Саньков В. А.* Математическое моделирование эволюции рельефа сбросового уступа на примере Святоносского поднятия (Байкальская впадина) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2015. Т. 12. С. 12–22.
- Гохман В. М., Гуревич Б. Л., Саушкин Ю. Г.* Проблемы метагеографии // Вопросы географии. Математика в экономической географии. 1968. № 77. С. 3–14.
- Килин С. Я.* Квантовая информация // Успехи физических наук. 1999. Т. 169, № 5. С. 507–527.
- Костюк В. Н.* Изменяющиеся системы. М. : Наука, 1993. 344 с.
- Крауклис А. А.* Применение организационных принципов в физической географии // Методологические вопросы географии. Иркутск : Ин-т географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР, 1977. С. 36–50.
- Крауклис А. А., Дружинина Н. П.* Некоторые итоги и перспективы моделирования элементарных геосистем // Моделирование элементарных геосистем. Иркутск : Ин-т географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР, 1975. С. 7–31.
- Николаев В. А.* К теории ландшафтного полигенеза // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2006. № 6. С. 3–8.
- Преображенский В. С.* Беседы о современной физической географии. М. : Наука, 1972. 167 с.
- Солнцев Н. А.* Учение о ландшафте (избранные труды). М. : Изд-во Моск. ун-та, 2001. 384 с.
- Солонин Ю. Н.* Проблема единства знания: между системностью и целостностью // Вече. Альманах русской философии и культуры. СПб. : С.-Петербург. ун-т, 1996. Вып. 6. С. 166–174.
- Сочава В. Б.* Практический смысл географических исследований и концепция прикладной географии // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. 1965. Вып. 9. С. 3–12.

- Сочава В. Б.* Вводное слово // Моделирование элементарных геосистем. Иркутск : Ин-т географии Сибири и Дальнего Востока СО АН СССР, 1975. С. 3–6.
- Сочава В. Б.* Введение в учение о геосистемах. Новосибирск : Наука, 1978. 319 с.
- Тённис Ф.* Общество и общество. Основные понятия чистой социологии. СПб. : Владимир Даль, 2002. 448 с.
- Тишков А. А.* География – наука будущего // Вестник Российской академии наук. 2022, Т. 92, № 6. С. 500–508.
- Черкашин А. К.* Классификация геосистем: аксиоматический подход // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 43. С. 102–126. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.102>
- Черкашин А. К., Солодянкина С. И.* Моделирование высотной структуры геомов Прибайкалья // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 141–148.
- Черкашин А. К., Фролов А. А.* Методы анализа иерархий в ландшафтных исследованиях // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87, № 1. С. 1–11.
- 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 Publ., 2017. Article N 5. P. 5:1–5:14.
- Bittner T.* Is there a quantum geography? // Springer Geography. 2019. P. 209–239.
- Cherkashin A.K.* Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society // Mathematical modelling of natural phenomena. 2009. Vol. 4, N 5. P. 4–20.
- Edwards M.* A brief history of holons // Integral World. 2023. URL: <https://www.integralworld.net/edwards13> (date of access: 21.08.2023).
- Everett H. III.* “Relative State” Formulation of Quantum Mechanics. PhD Thesis. Princeton, Princeton University, 1957. 22 p.
- Husemoller D.* Fibre bundles. New York : Springer, 2013. 356 p.
- Koestler A.* The ghost in the machine. New York : Macmillan, 1967. 384 p.
- Nielsen M. A., Chuang I. L.* Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge : Cambridge University Press, 2010. 676 p.
- Osgood C. E., Suci G., Tannenbaum P.* The Measurement of Meaning. Urbana, Chicago. London : University of Illinois Press, 1957. 372 p.
- Peterman W.* Quantum Theory and Geography: What Can Dr. Bertlmann Teach Us // The Professional Geographer. 1994. Vol. 46, N 1. P. 1–9.
- Preskill J.* Quantum information and computation. Cambridge University Press, 2020. 325 p.
- Rodoman B. B.* Logical and Cartographic Forms of Regionalization and Their Study Objectives // Soviet Geography: Review & Translation. N. Y., 1965. P. 3–20.
- Saaty T. L.* The seven pillars of the analytic hierarchy process // Multiple criteria decision making in the new millennium. Lecture notes in economics and mathematical systems / ed by M. Köksalan, S. Zionts. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2001. Vol. 507. P. 27–46.
- Smith T. S. J.* What ever happened to quantum geography? Toward a new qualified naturalism // Geoforum. 2016. Vol. 71. P. 5–8.
- Smuts J. C.* Holism and Evolution. London : Richard Clay&Sons, 1936. 359 p.
- Tarjan R. E., Leeuwen J.* Worst-case analysis of set union algorithms // Journal of the Association for Computing Machinery. 1984. Vol. 31, N 2. P. 245–281.
- Whittaker R. H.* Communities and ecosystems. New York : Macmillan Publishing Co., 1975. 385 p.
- Wilber K.* Sex, ecology and spirituality: The evolution of spirit. New York : Shambhala Publications, 1995. 856 p.
- Wilber K.* An integral theory of consciousness // Journal of Consciousness Studies. 1997. Vol. 4, N 1. P. 71–92.

References

- Abramova N.T.* *Celostnost i upravlenie* [Integrity and Governance]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 248 p. (in Russian)
- Aleksandrova V.D.* *Klassifikaciya rastitelnosti. Obzor principov klassifikacii i klassifikacionnyh sistem v razlichnyh geobotanicheskikh shkolah* [Classification of Vegetation. Review of Classification Principles and Classification Systems in Various Geobotanical Schools]. Leningrad, Nauka Publ., 1969, 275 p. (in Russian)

Baklanov P.Ya. Strukturizaciya geograficheskogo prostranstva – osnova teoreticheskoy geografii [Structuring of Geographical Space is the Basis of Theoretical Geography]. *Teoriya socialno-ekonomicheskoy geografii: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Theory of Socio-economic Geography: Current State and Prospects of Development]. Rostov-na-Donu, YuFU Publ., 2010, pp. 12-20.

Byzov L.M., Sankov V.A. Matematicheskoe odelirovanie evolyucii reliefa sbrosovogo ustupa na primere Svyatonosskogo podnyatiya (Bajkalskaya vpadina) [Mathematical Modeling of the Evolution of the Relief of a Discharge Ledge on the Example of the Svyatonossky uplift (Baikal Depression)]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2015, vol. 12, pp. 12-22. (in Russian)

Gohman V.M., Gurevich B.L., Saushkin Yu.G. Problemy metageografii [Problems of Metageography]. *Voprosy geografii. Matematika v ekonomicheskoy geografii* [Questions of geography. Mathematics in economic geography], 1968, no. 77, pp. 3-14. (in Russian)

Kilin S.Ya. Kvantovaya informaciya [Quantum Information]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of Physical Sciences], 1999, vol. 169, no. 5, pp. 507-527. (in Russian)

Kostyuk V.N. *Izmenyayushchiesya sistemy* [Changing Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1993, 344 p. (in Russian)

Krauklis A.A. Primenenie organizacionnyh principov v fizicheskoy geografii [Application of Organizational principles in physical geography]. *Metodologicheskie voprosy geografii* [Methodological Questions of Geography]. Irkutsk, Institute of Geography of Siberia and the Far East of the SB AS USSR Publ., 1977, pp. 36-50. (in Russian)

Krauklis A.A., Druzhinina N.P. Nekotorye itogi i perspektivy modelirovaniya elementarnyh geosistem [Some Results and Prospects of Modeling Elementary Geosystems]. *Modelirovanie elementarnyh geosistem* [Modeling of Elementary Geosystems]. Irkutsk, Institute of Geography of Siberia and the Far East SB AS USSR Publ., 1975, pp. 7-31. (in Russian)

Nikolaev V.A. K teorii landshaftnogo poligenezha [Towards the Theory of Landscape Polygenesis]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5, Geografiya* [Bulletin of the Moscow University. Series 5, Geography], 2006, no. 6, pp. 3-8. (in Russian)

Preobrazhenskij V.S. *Besedy o sovremennoj fizicheskoy geografii* [Conversations about Modern Physical Geography]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 167 p. (in Russian)

Solncev N.A. *Uchenie o landshafte (izbrannye trudy)* [The Doctrine of the Landscape (selected works)]. Moscow, Moscow State University Publ., 2001, 384 p. (in Russian)

Solonin Yu.N. Problema edinstva znaniya: mezhdru sistemnostiyu i celostnostiyu [The problem of Unity of Knowledge: between Consistency and Integrity]. *Veche. Almanah russkoj filosofii i kultury* [Veche. Almanac of Russian Philosophy and Culture]. Saint Petersburg, St. Petersburg University Publ., 1996, iss. 6. pp. 166-174. (in Russian)

Sochava V.B. Prakticheskij smysl geograficheskikh issledovanij i koncepciya prikladnoj geografii [The Practical Meaning of Geographical Research and the Concept of Applied Geography]. *Doklady In-ta geografii Sibiri i D. Vostoka* [Reports of the Institute of Geography of Siberia and the Far East SB AS BSSR], 1965, iss.9, pp. 3-12. (in Russian)

Sochava V.B. Vvodnoe slovo [Introductory Word]. *Modelirovanie elementarnyh geosistem* [Modeling of Elementary Geosystems]. Irkutsk, Institute of Geography of Siberia and the Far East SB AS USSR Publ., 1975, pp. 3-6. (in Russian)

Sochava V.B. *Vvedenie v uchenie o geosistemah* [Introduction to the Doctrine of Geosystems], Novosibirsk, Nauka Publ., 1978, 319 p. (in Russian)

Tyonnis F. *Obshchnost i obshchestvo. Osnovnye ponyatiya chistoy sociologii* [Community and Society. Basic Concepts of Pure Sociology]. Saint Petersburg, Vladimir Dal Publ., 2002, 448 p. (in Russian)

Tishkov A.A. Geografiya – nauka budushchego [Geography is Science of the Future]. *Vestnik rossijskoj akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2022, vol. 92, no. 6, pp. 500-508. (in Russian)

Cherkashin A.K. Klassifikaciya geosistem: aksiomaticheskij podhod [Classification of Geosystems: Axiomatic Approach]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Earth Science Series], 2023, vol. 43, pp. 102-126. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2023.43.102> (in Russian)

Cherkashin A.K., Solodyankina S.I. Modelirovanie vysotnoj struktury geomov Pribajkaliya [Modeling of the High-altitude Structure of the Baikal Genomes]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources], 2011, no. 2, pp. 141–148. (in Russian)

- Cherkashin A.K., Frolov A.A. Metody analiza ierarhij v landshaftnyh issledovaniyah [Analytic Hierarchy Process in Landscape Studies]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya* [Bulletin RAS. The series is Geographical], 2023, vol. 87, no. 1, pp. 1-11. (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, pp. 5:1-5:14.
- Bittner T. Is there a Quantum Geography? *Springer Geography*, 2019, pp. 209-239.
- Cherkashin A.K. Polysystem Modelling of Geographical Processes and Phenomena in Nature and Society. *Mathematical modelling of natural phenomena*, 2009, vol. 4, no. 5, pp. 4-20.
- Edwards M. A Brief History of Holons. *Integral World*, 2023. Available at: <https://www.integralworld.net/edwards13> (date of access: 21.08.2023).
- Everett H.III. «Relative State» Formulation of Quantum Mechanics. PhD Thesis. Princeton (NJ), Princeton University, 1957, 22 p.
- Husemoller D. *Fibre bundles*. New York, Springer, 2013, 356 p.
- Koestler A. *The Ghost in the Machine*. New York, Macmillan, 1967, 384 p.
- Nielsen M.A., Chuang I.L. *Quantum Computation and Quantum Information* Cambridge. Cambridge University Press, 2010, 676 p.
- Osgood C. E., Suci G., Tannenbaum P. *The Measurement of Meaning*. Urbano, Chicago, London, University of Illinois Press, 1957, 372 p.
- Peterman W. Quantum Theory and Geography: What Can Dr. Bertlmann Teach Us. *The Professional Geographer*. 1994. vol. 46, no. 1, pp. 1-9.
- Preskill J. *Quantum Information and Computation*. Cambridge University Press, 2020, 325 p.
- Rodoman B.B. Logical and Cartographic Forms of Regionalization and Their Study Objectives. *Soviet Geography: Review & Translation*. N.Y., November 1965, pp. 3-20.
- Saaty T.L. The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process. *Köksalan M., Zions S. (eds.). Multiple criteria decision making in the new millennium. Lecture notes in economics and mathematical systems*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2001, vol. 507, pp. 27-46.
- Smith T.S.J. What Ever Happened to Quantum Geography? Toward a New Qualified Naturalism. *Geoforum*, 2016, vol. 71, pp. 5-8.
- Smuts J.C. *Holism and Evolution*, London, Richard Clay&Sons, 1936, 359 p.
- Tarjan R.E., Leeuwen J. Worst-case Analysis of Set Union Algorithms. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1984, vol. 31, no. 2, pp. 245-281.
- Whittaker R.H. *Communities and Ecosystems*. Macmillan Publishing Co., Inc., 1975, 385 p.
- Wilber K. Sex, Ecology and Spirituality: The evolution of spirit. New York, Shambhala Publications, 1995, 856 p.
- Wilber K. An Integral Theory of Consciousness. *Journal of Consciousness Studies*, 1997, vol. 4, no. 1, pp. 71-92.

Сведения об авторе

Черкашин Александр Константинович
 доктор географических наук, профессор,
 главный научный сотрудник, лаборатория
 теоретической географии
 Институт географии им. В. Б. Сочавы
 СО РАН
 Россия, 664033, г. Иркутск,
 ул. Улан-Баторская, 1
 e-mail: akcherk@irnok.net

Information about the author

Cherkashin Alexander Konstantinovich
 Doctor of Sciences (Geography), Professor,
 Chief Researcher, Laboratory of Theoretical
 Geography
 V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS
 1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
 Russian Federation
 e-mail: akcherk@irnok.net

Коды научной специальности: 1.6.12

Статья поступила в редакцию **02.10.2023**; одобрена после рецензирования **09.03.2024**; принята к публикации **11.03.2024**
 The article was submitted **October, 02, 2023**; approved after reviewing **March, 09, 2024**; accepted for publication **March, 11, 2024**