

## Технология математического моделирования и картографирования изменчивости геосистем

А. А. Фролов, А. К. Черкашин ✉

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Российская Федерация  
(664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1)

**Аннотация.** Цель – создать технологическую схему математического моделирования, ГИС-анализа и картографирования разных аспектов пространственно-временной изменчивости геосистем на примере Байкальского региона.

**Материалы и методы.** Исходными данными для количественного анализа послужили частотные распределения геомов по высоте местоположения для отдельных физико-географических областей (ФГО) региона, полученные оверлеем – наложением цифровой карты рельефа на электронную карту геомов. Методами теории надежности рассчитывались статистические показатели надежности и интегрированной опасности функционирования разных геомов, описывающие закономерности их высотного распространения в местной среде. Дальнейшая обработка данных осуществляется по различным направлениям в зависимости от конкретных задач изучения разных сторон пространственно-временной динамики геосистем: исследование квантовых уровней изменчивости геомов по высоте; расчет коэффициентов моделей высотного распределения геомов, характеризующих разнообразие геосреды; физико-географическая оценка высотного размещения геомов разных ФГО. Для иллюстрации проведен тренд-анализ пространственных изменений вычисленных высотных характеристик геомов по трансекту, пересекающему отдельные ФГО.

**Результаты и обсуждение.** Исследования количественно обосновывают различия в особенностях высотного распределения геомов на территориях с разными климатическими и геоморфологическими характеристиками, тем самым выделяют возможные направления временных изменений геомов в результате климатических трансформаций и развития рельефа.

**Выводы.** Разрабатываемая технологическая схема имеет хорошие перспективы применения при оценочных и прогнозных исследованиях и моделировании геосистем.

**Ключевые слова:** геом, изменчивость геосистем, теория надежности, ГИС-анализ, математические модели, физико-географическая область, Байкальский регион.

**Источник финансирования:** Работа выполнена за счет средств государственного задания Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН (№ 126020516555-4).

**Для цитирования:** Фролов А. А., Черкашин А. К. Технология математического моделирования и картографирования изменчивости геосистем // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2026, № 1, с. 37-43. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/1/37-43>

### ВВЕДЕНИЕ

Природные ландшафты изменяются и в пространстве, и во времени, причем временные преобразования трудно проследить по причине их медленного протекания, поэтому при изучении геологической динамики используются сравнительные методы, когда территории изучаются в разных эволюционных состояниях, накапливаются массивы данных, делаются эмпирические обобщения и строятся концептуальные схемы смены этапов развития [3]. Для того, чтобы статистически правильно обработать данные и «оживить» графические схемы общесистемного содержания в географической науке используются геоинформационные и математические технологии, без применения которых многие исследовательские задачи просто не решаются. С этой целью необходимо выбрать адекватный аппарат моделирования и средства матанализа пространственных и временных рядов данных.

Исследуются и моделируются эндогенные и экзогенные процессы географического цикла рельефообразования. Особое внимание ранее уделялось описанию литогенной структуры ландшафтов и механизмов склоновых геоморфологических процессов с использованием уравнений математической диффузионного типа [10]. На примере эрозионно-термокарстовых равнин на основе данных дистанционного зондирования показано, как методы математической геоморфологии ландшафта позволяют проводить анализ преобразования территории в условиях взаимодействия нескольких экзогенных геологических процессов [1]. В геологии и географии одна и та же задача может быть решена разными способами, и для обработки данных необходимо в сочетании использовать модели и методы различного типа [5, 19].

Цель этой работы – создание по опыту предшествующих исследований [15, 16] схемы информационной технологии ГИС-картографирования и модели-



рования разных аспектов пространственно-временной изменчивости геосистем, их распределения по высоте местоположения и физико-географическим областям Байкальского региона для информационного обеспечения задач изучения эволюции ландшафтной структуры территории.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования рассматриваются геосистемы (геомы) территории Байкальского региона (в административных границах Республики Бурятия, Иркутской области и Забайкальского края), представленной участками четырех физико-географических областей (ФГО) 1-4: 1 – Южно-Сибирской горной (абсолютная высота над уровнем моря 200-3000 м), 2 – Байкало-Джугдурской горнотаёжной (100-2700 м), 3 – Среднесибирской таёжно-плоскогорной (100-1000 м) и 4 – Северо-Монгольской полупустынно-степной (400-1000 м). Территория со сложной геомерной структурой расположена в центре Евразии в поясе умеренных широт. Геом – наименьшая региональная типологическая единица (геомер), разновидность типа природной среды, соразмерная виду ландшафта. На территории выделено 37 геомов, относящихся к трем типам природной среды – гольцовой, таежной и степной. Геомы пронумерованы латинскими цифрами I-XXXVII по порядку легенды ландшафтной карты [9]. Развитие геосистем территории шло под влиянием Байкальской рифтовой зоны и воздействием региональных тектонических и геодинамических факторов [12] с формированием разновозрастных геологических структур различного генезиса.

**Основные понятия и модели.** При отображении динамики геолого-географической среды часто применяются два эквивалентных способа описания: эйлеров и лагранжев подходы [13]. Детерминированное движение по Лагранжу представляет собой перемещение объекта по индивидуальной траектории, в частности, обломков горных пород по склону как твердых тел с вращением и деформацией. В эйлеровом процессе, например, при движении воды в конкретном створе речного русла, пространственные координаты фиксированы, поэтому лучше подходят для моделирования открытых потоков (с притоками и стоками) элементов через границы состояний и распределения элементов по их местным характеристикам  $x = \{x_i\}$  различной природы *i*.

Для статистического анализа изменения частотных распределений  $P(x)$  элементов системы применяются методы теории надежности, где  $P(x)$  понимается как плотность отказа или неотказа элементов системы нормально функционировать при значениях их параметров  $x$ . Эта величина связана с другими показателями надежности формулами

$$P(x) = \pm \frac{\partial P^*(x)}{\partial x} \geq 0, E(x) = -\ln P^*(x) \geq 0, \quad (1)$$

где  $P^*(x)$  – функция надежности, вероятность безотказной работы или накопленных отказов работы элементов системы до состояния с характеристиками  $x$ ;  $E(x)$  – интегрированная опасность, накопленный риск  $p(x)$ .

В случае высотного распределения  $P(x)$  – это функция плотности вероятности проявления (неотказа) на территории участков геосистем определенного вида по градациям изменения  $\Delta x$  высоты  $x$ ;  $E(x)$  – интегрированная опасность, показатель того, что ареалы данного геомера не будут встречаться до высоты  $x$ . Величина  $P^*(x)$  рассчитывается по распределению  $P(x)$  последовательным вычитанием из  $P^*(0) = 1$  значения  $P(x)$  на каждом шаге  $\Delta x$  по мере увеличения высоты местоположения.

Показано [16], что лучшее приближение статистических данных дает функция распределения Фреше характеристики  $z = \alpha \ln(x/x_m)$  ( $\alpha, x_m$  – индивидуальные константы)

$$P^*(z) = \exp\{-\exp(z)\} \quad (2)$$

с функцией плотности распределения:

$$P(z) = \exp(z)\exp[-\exp(z)]. \quad (3)$$

Величина опасности равна  $E(z) = -\ln P^*(z) = \exp(z) = \exp[\alpha(\ln x - \ln x_m)]$  при  $z = \ln E(z) = \alpha(\ln x - \ln x_m)$ . Ее изменение  $dE(z)/dz = \exp(z)$ , когда величины опасности  $E(z)$  и риска  $p(z)$  совпадают:

$$P(z) = dE(z)/dz = E(z). \quad (4)$$

Это соотношение отражает механизм саморегулирования в показателях опасности  $E(z)$ . Простая по форме  $E(z) = \exp(z)$  растущая с высотой величина  $E(z)$  удобна для линейного статистического анализа, по результатам которого рассчитываются остальные показатели надежности:

$$z = \ln E(z) = \alpha \ln x - \alpha \ln x_m. \quad (5)$$

Кривая высотного распределения  $P(x)$  встречаемости (неотказов) участков геомов разного типа соответствует геосистемной нише – ординации ее возможных состояний по фактору высоты положения или в пространстве соответствующих климатических показателей. На лагранжевом перемещении вдоль координаты  $x$  плотности распределения  $P(x) \rightarrow P(x+\Delta x)$  как целого основывается традиционный прием прогнозирования динамических и эволюционных изменений растительного покрова при потеплении климата [11]. При эйлеровом подходе в такой ситуации детально описывается перемещение ареалов разных геосистем с одного высотного уровня на другой, в результате чего трансформируется распределение  $P(x)$ .

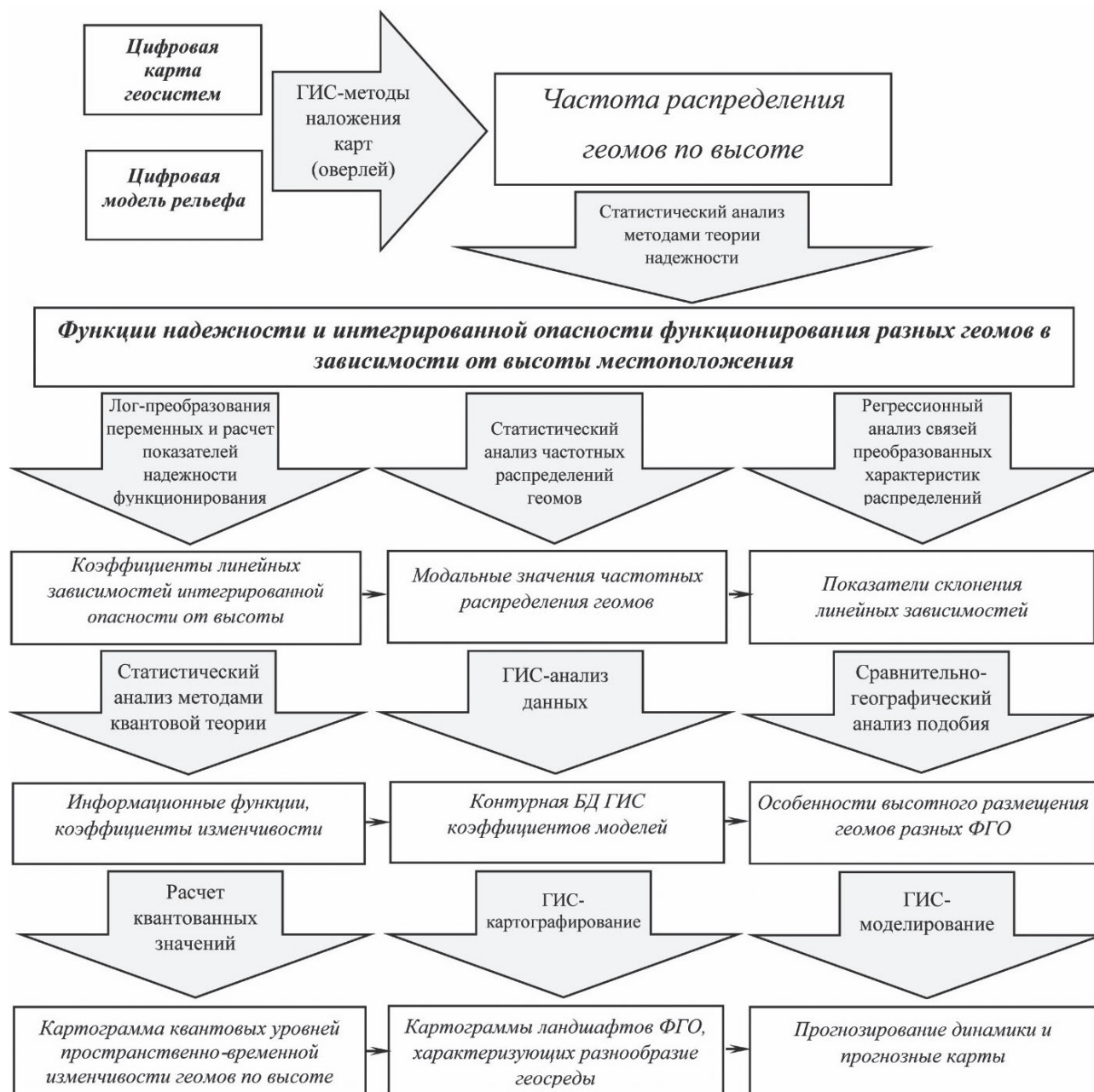
#### Технологическая схема обработки информации.

В концептуальной схеме отражается процесс исследования в последовательности преобразования информации по выбранным моделям и методам (рис. 1). В нашем случае в обработку поступает информация базы данных электронных карт – цифровой модели рельефа (ЦМР) на базе фрагмента глобального покрытия SRTM с разрешением 3 угловых секунды и карты «Ландшафты юга Восточной Сибири» [6, 9] с контурами геомов.

Расчет высотных распределений геосистем по каждой ФГО осуществляется методом наложения картографических данных: производится оверлей ЦМР на сетку карты контуров геомов территории ФГО. В результате формируется таблица встречаемости площа-

дей (в условных единицах) участков различных геомов по высоте. В таблицах Excel эти площади объединяются  $S_j(x)$  с шагом  $\Delta x=100$  м по высоте  $x$ , и рассчитывается частота встречаемости  $P_j(x) = S_j(x)/S_{0j}$  площади геомов ( $S_{0j}$  – суммарная площадь  $j$ -го геоба на территории). Выявленные эмпирические зависимости используются для расчета остальных показателей надежности согласно соотношениям (1) [15] для выявления скрытых в исходных данных закономерностей.

Обработка данных проводится по различным направлениям (см. рис. 1). Методом регрессионного анализа  $\ln E(z) = a \ln x + b$  согласно соотношению (5) находятся коэффициенты: модальных значений  $x_m = \exp(-b/a)$  и наклона  $\alpha = a$  (склонения) линий зависимостей  $\ln E(z)$ , соответствующие частотным распределениям  $P(z)$ . Логарифмированием достигается перевод размерных величин в безразмерные [20], что позволяет делать обобщающие выводы в разных системных и формаль-



Условные обозначения: прямоугольники – исходная информация, промежуточные и конечные результаты статобработки, фигурные стрелки – последовательности процедур преобразования информации, простые стрелки – передача и накопление информации

Рис. 1. Технологическая схема обработки данных для математического моделирования и ГИС-картографирования пространственно-временной изменчивости геосистем  
 [Fig. 1. Technological scheme of data processing for mathematical modeling and GIS mapping of spatial and temporal variability of geosystems]

но-математических интерпретациях индивидуальных и потоковых перемещений структур геомных ниш и объяснения их внутренних дискретных свойств с позиций квантовой теории функциональных пространств [14, 15]. По вычисленным коэффициентам осуществляется прогноз и картографирование новой ситуации при потеплении климата или изменении рельефа.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределения  $P_j(x)$  одного геома  $j$  разных ФГО отличается модальными значениями  $x_{mj}$  и склонениями  $\alpha_j$ , (рис. 2). На основе этих коэффициентов для всякого ландшафтного контура соответствующего ФГО по модели (3) рассчитывается и картографически визуализируется величина  $P_j(x)$ .

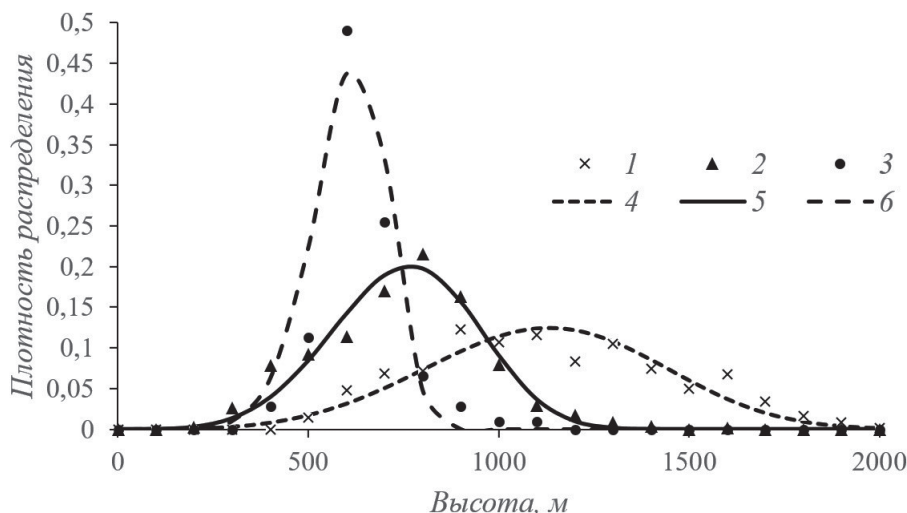
При сравнительном анализе выделяются геосистемы-аналоги, под которыми понимаются таксономически равноценные ландшафтные единицы любого ранга, обнаруживающие сходство в структуре и динамике [7]. Они находятся в границах различных районов в сходных геоморфологических условиях на разных высотных уровнях [17]. В нашем случае распределения однотипных геомов в различных областях смещены относительно друг друга (см. рис. 2), что объясняется особенностями широтно-климатического и геоморфологического влияния. Например, встречаемость геома  $j = 15$  различается по областям, максимум и моде кривых распределения. Модальное положение  $x_m$  снижается с уменьшением средней высоты ФГО и размещением ФГО ближе к северу. Максимум распределения  $P_m$  растет в обратном порядке, что указывает на более сильное влияние факторов, ограничивающих изменчивость. При перемещении на север

и выравнивании рельефа некоторые геомы начинают встречаться редко и совсем исчезают. Надо полагать, что при более благоприятном температурном режиме ареалы геомов продвигаются вверх по горным склонам до предельной высоты рельефа. Вместе с тем ясно, что простого смещения кривых частотных распределений (по Лагранжу) с сохранением формы распределений недостаточно – для учета снижения их дисперсии необходимо использовать потоковые уравнения по схеме Эйлера для показателей надежности.

В практике геологических работ распространение получил тренд-анализ при сопоставлении разрезов, картировании геологических характеристик [1] с целью выявления тенденции их изменения. Этот метод анализа использован для выявления региональной и локальной составляющей при решении палеогеографических задач [4]. Поскольку ФГО находятся на разных стадиях развития рельефа, по пространственной последовательности смены характеристик геомов можно проследить временную тенденцию эволюции геомной структуры.

Для выявления линий тренда выделен трансект, проходящий с юга на север от хребтов Восточного Саяна Южно-Сибирской горной области и далее по Ангарскому кряжу юго-восточной части Среднесибирского плоскогорья, пересекая долины рек Ангары и Нижней Тунгуски. Сечение проходит по середине Байкальского концентрика [8] в районе Братского водохранилища на излучине русла реки Ангары.

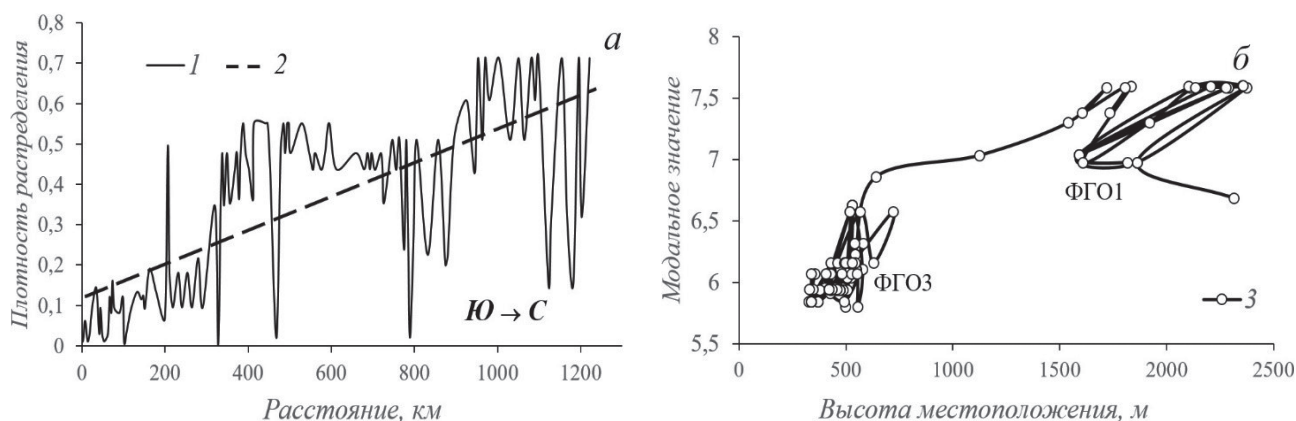
На трансекте выделяются два характерных высотных уровня и два узла (аттрактора) связи характеристик геомов для Южно-Сибирской горной и Среднесибирской таежно-плоскогорной ФГО (рис. 3).



Условные обозначения: точки – исходные данные, линии – кривые, рассчитанные по модели (3)

Рис. 2. Плотность распределения  $P_j(x)$  по грациям  $\Delta x = 100$  м высоты  $x$  площади геомов  $j = 15$  горнотаежных темнохвойных лесов (ограниченного развития) разных физико-географических областей: ФГО 1 (1, 4), коэффициенты  $\alpha_j = 3,59$ ,  $b = -\alpha_j \ln x_m - 25,2$ ; ФГО 2 (2, 5),  $a = 3,93$ ,  $b = -26,1$ ; ФГО 3 (3, 6),  $a = 6,51$ ,  $b = -42,8$ .

[Fig. 2. Distribution density  $P_j(x)$  by gradation  $x = 100$  m height  $x$  area of the geom  $j = 15$  mountain taiga dark coniferous forests (of limited development) of different physical and geographical areas: FGR1 (1, 4), coefficients  $\alpha_j = 3,59$ ,  $b = -\alpha_j \ln x_m - 25,2$ ; FGR 2 (2, 5),  $a = 3,93$ ,  $b = -26,1$ ; FGR 3 (3, 6),  $a = 6,51$ ,  $b = -42,8$ .]



Условные обозначения: 1 – изменение значений  $P_j(x)$  с расстоянием;

2 – тренд пространственных изменений  $P_j(x)$ ; 3 – тенденция временных преобразований геомной структуры

Рис. 3. Изменчивость плотности высотного распределения площади геомов  $P_j(x)$  (вероятности встречаемости) вдоль трансекта (а) и зависимость модальных значений  $x_m$  этих распределений в единицах  $z_m = \ln x_m$  от высоты местоположения  $x$  участков контуров (б)

[Fig. 3. Variability of the altitude distribution density of area of geomes  $P_j(x)$  (probability of occurrence) along the transect (a) and the dependence of the modal values  $z_m$  of these distributions in units  $z_m = \ln x_m$  on the height of the location  $x$  of contour sections (b)]

Частота встречаемости  $P_j(x)$  по высоте  $x$  и размещению геомов увеличивается к северу по направлению пространственного перехода ФГО1 → ФГО3 вдоль трансекта (см. рис. 3а). Проявляются градации трех уровней, связанные с геоморфологическими и климатическими различиями. Это аналогично временному преобразованию (см. рис. 3б) положения аттракторов связей внутренних  $x_m$  и внешних характеристик  $x$  высотной структуры геомов. Здесь аттракторы – это узлы ординации по вычисленным локальным значениям факторных характеристик. Их перемещение выражается в перестройке геомной структуры в процессе адаптации живой и неживой природы к результатам трансформации географической среды. Смещение этих узлов в ординационном пространстве соответствует эволюции геосистем по разным направлениям, например, изменению их положения при потеплении климата, что необходимо учитывать при прогнозном моделировании и картографировании.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологии применения математических и геоинформационных методов при картометрических исследованиях основаны на принципах теории сплошной среды. В сочетании с уравнениями теории надежности они позволяют отобразить в моделях структуру и пространственно-временную динамику систем, их саморазвитие и эволюционную трансформацию. С этой целью используются традиционные подходы Эйлера и Лагранжа к моделированию динамики с учетом размножения, добавления и выбывания элементов из процесса с разными темпами. Интенсивность сохранения и выбытия, опасность и риски функционирования и другие показатели описываются в терминах теории надежности.

Основываясь на предыдущем опыте, для статанализа частотных распределений по высоте местоположения

ареалов различных типов региональных геосистем (геомов) создана работающая технологическая схема обработки пространственной информации для выявления закономерностей строения и развития геосистем, картографирования и прогнозирования их изменения под влиянием факторов окружающей среды. Решаются прямые и обратные задачи моделирования с оценкой параметров моделей для сравнения ландшафтных территорий, находящихся на разных этапах географического цикла горообразования, с расчетом структурных перестроек в геомном составе физико-географических областей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов А.С., Капралова В.Н., Орлов Т.В. Анализ развития экзогенных геологических процессов на основе моделей математической морфологии ландшафта // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*, 2023, № 6, с. 16-25.
2. Виноградов Б.В., Фролов Д.Е., Попов В.А. Опыт моделирования динамики экорегиона с помощью неоднородных цепей Маркова // *Доклады АН СССР*, 1989, т. 308, № 5, с. 1263-1266.
3. Виноградов Б.В. *Основы ландшафтной экологии*. Москва: ГЕОС, 1998. 418 с.
4. *Геологический словарь* / Х.А. Арсланов, М.Н. Голубчина, А.Д. Искандерова и др. Москва: Недра, 1978. 456 с.
5. Гриб Н.Н., Терещенко М.В. Моделирование геологических систем // *Фундаментальные исследования*, 2015, № 12-1, с. 22-25.
6. Кузнецова Т.И., Батуев А.Р., Бардаш А.В. Карта «Природные ландшафты Байкальского региона и их использование»: назначение, структура, содержание // *Геодезия и картография*, 2009, № 9, с. 18-28.
7. Мильков Ф.Н. О морфологических и генетических типах ландшафтов-аналогов // *Труды 2-го Всесоюзного географического съезда*, 1948, т. 1, с. 270-281.
8. Михеев В.С. *Ландшафтно-географическое обеспечение комплексных проблем Сибири*. Новосибирск: Наука, 1987. 208 с.

9. Михеев В. С., Ряшин В. А. *Ландшафты юга Восточной Сибири. Карта. М 1:1500000*. Москва: ГУГК, 1977. 4 л.
10. Московкин В. М., Трофимов А. М. *Математическое моделирование в геоморфологии склонов*. Казань: Издательство Казанского университета, 1983. 214 с.
11. Назимова Д. И., Поликарпов Н. П. Возможен ли прогноз лесного покрова Сибири на XXI век? // *Природа*, 2001, № 4, с. 55-62.
12. Ноговицын В. Н. Современная структура и тенденции трансформации геосистем Предбайкалья // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2024, № 1, с. 27-33.
13. Седов Л. И. *Механика сплошной среды. Том 1*. Москва: Наука, 1994. 528 с.
14. Черкашин А. К. Квантовая география: задачи типизации, классификации и районирования // *Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле*, 2024, т. 47, с. 90-116.
15. Черкашин А. К., Фролов А. А. Дискретный анализ пространственно-временной изменчивости геосистем Байкальской Сибири // *Известия РГО*, 2024, т. 156, № S3-2, с. 213-234.
16. Черкашин А. К., Фролов А. А. Сравнительно-географический анализ высотного распределения геомов разных физико-географических областей // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*, 2025, т. 51, с. 107-124.
17. Черных Д. В. Провинциальные и внутрипровинциальные ландшафты-аналоги в бассейне Телецкого озера (Русский Алтай) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2024, № 1, с. 49-55.
18. Ismail-Zadeh A., Teckley P. *Computational methods for geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 313 p.
19. Slingerland R., Kump L. *Mathematical modeling of earth's dynamical systems: a primer*. Princeton: Princeton University Press, 2011. 231 p.
20. Zavadskas E., Turskis Z. A New Logarithmic Normalization Method in Games Theory // *Informatica*, 2008, vol.19, no. 2, pp. 303-314.
- Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 22.05.2025  
Принята к публикации: 27.02.2026

UDC 911.52

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/1/37-43>

## Technology of Mathematical Modeling and Mapping of Geosystem Variability

A. A. Frolov, A. K. Cherkashin ✉

V. B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Russian Federation  
(664033, Irkutsk, Ulaanbaatar Str., 1)

**Abstract.** The purpose is to create a technological scheme for mathematical modeling, GIS analysis, and mapping of various aspects of spatial and temporal variability of geosystems using the example of the Baikal region.

**Materials and methods.** The initial data for quantitative analysis were the frequency distributions of geomes by height location for individual physico-geographical regions (FGR), obtained by overlay - superimposing a digital relief map on an electronic geomes map. Statistical indicators of reliability and integrated hazard of functioning of different geomes were calculated using methods of reliability theory, describing the patterns of their high-altitude distribution in the local environment. Further data processing is carried out in various directions, depending on the specific tasks of studying different aspects of the spatial and temporal geosystems dynamics: the study of quantum levels of geome variability in height; calculation of coefficients of models of geome height distribution characterizing the diversity of the geo-environment; physical and geographical assessment of the high-altitude location of geomes in different FGR. To illustrate, a trend analysis of spatial changes in the calculated elevation characteristics of geomes along a transect intersecting individual FGR was carried out.

**Results and discussion.** The research quantifies the differences in the features of the high-altitude distribution of geomes in territories with different climatic and geomorphological characteristics, thereby highlighting possible directions of temporary changes in geomes as a result of climatic transformations and relief development.

**Conclusions.** The technological scheme developed has good prospects for application in the evaluation and forecasting studies and modeling of geosystems.

**Key words:** geome, variability of geosystems, reliability theory, GIS analysis, mathematical models, physical and geographical area, Baikal region.

**Funding:** This work was carried out using funds from the State Task of the Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (№ 126020516555-4).

**For citation:** Cherkashin A. K., Frolov A. A. Technology of Mathematical Modeling and Mapping of Geosystem Variability. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografija. Geoekologia*, 2026, no. 1, pp. 37-43. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2026/1/37-43>

© Cherkashin A. K., Frolov A. A., 2026

✉ Alexander K. Cherkashin, e-mail: akcherk@irnok.net



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

REFERENCES

1. Viktorov A. S., Kapralova V. N., Orlov T. V. Analiz razvitiya ekzogennykh geologicheskikh processov na osnove modelej matematicheskoy morfologii landshafta [Analysis of the development of exogenous geological processes based on models of mathematical morphology of the landscape]. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2023, no. 6, pp. 16-25. (In Russ.)
2. Vinogradov B. V., Frolov D. E., Popov V. A. Opyt modelirovaniya dinamiki ekoregiona s pomoshch'yu neodnorodnykh cepей Markova [Experience in modeling the dynamics of an ecoregion using heterogeneous Markov chains]. *Doklady AN SSSR*, 1989, vol. 308, no. 5, pp. 1263-1266. (In Russ.)
3. Vinogradov B. V. *Osnovy landshaftnoy ekologii* [Fundamentals of landscape ecology]. Moscow: GEOS, 1998. 418 p. (In Russ.)
4. *Geologicheskij slovar'* [Geological Dictionary] / H. A. Arslanov, M. N. Golubchina, A. D. Iskanderova i dr. Moscow: Nedra, 1978. 456 p. (In Russ.)
5. Grib N. N., Tereshchenko M. V. Modelirovanie geologicheskikh system [Modeling of geological systems]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, no. 12-1, pp. 22-25. (In Russ.)
6. Kuznecova T. I., Batuev A. R., Bardash A. V. *Karta «Prirodnye landshafty Bajkal'skogo regiona i ih ispol'zovanie»: naznachenie, struktura, sodержanie* [Map «Natural landscapes of the Baikal region and their use»: purpose, structure, content]. *Geodeziya i kartografiya*, 2009, no. 9, pp. 18-28. (In Russ.)
7. Mil'kov F. N. O morfologicheskikh i geneticheskikh tipah landshaftov-analogov [On the morphological and genetic types of analogue landscapes]. *Trudy 2-go Vsesojuznogo geograficheskogo s'ezda*, 1948, vol. 1, pp. 270-281. (In Russ.)
8. Miheev V. S. Landshaftno-geograficheskoe obespechenie kompleksnykh problem Sibiri [Landscape and geographical support of complex problems of Siberia]. Novosibirsk: Nauka, 1987. 208 p. (In Russ.)
9. Miheev V. S., Ryashin V. A. *Landshafty yuga Vostochnoj Sibiri. Karta. M 1:1500000* [Landscapes of the south of Eastern Siberia. Map. M 1:1500000]. Moscow: GUGK, 1977. 4 sh. (In Russ.)
10. Moskovkin V. M., Trofimov A. M. *Matematicheskoe modelirovanie v geomorfologii sklonov* [Mathematical modeling in slope geomorphology]. Kazan: Idate'l'stvo Kazanskogo universiteta, 1983. 214 p. (In Russ.)
11. Nazimova D. I., Polikarpov N. P. Vozmozhen li prognoz lesnogo pokrova Sibiri na XXI vek? [Is it possible to forecast Siberian Forest cover for the 21st century?]. *Priroda*, 2001, no. 4, pp. 55-62. (In Russ.)
12. Nogovicyn V. N. Sovremennaya struktura i tendencii transformacii geosistem Predbajkal'ya [Modern Structure and Trends of Transformation of Geosystems of the Pre-Baikal Region]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2024, no. 1, p. 27-33. (In Russ.)
13. Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoj sredy. Tom 1* [Continuum mechanics]. Moscow: Nauka, 1994. 528 p. (In Russ.)
14. Cherkashin A. K. Kvantovaya geografiya: zadachi tipizacii, klassifikacii i rajonirovaniya [Quantum geography: problems of typification, classification and zoning]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle*, 2024, vol. 47, pp. 90-116. (In Russ.)
15. Cherkashin A. K., Frolov A. A. Diskretnyj analiz prostranstvenno-vremennoj izmenchivosti geosistem Bajkal'skoj Sibiri [Discrete analysis of spatial and temporal variability of geosystems of Baikal Siberia]. *Izvestiya RGO*, 2024, vol. 156, no. S3-2, pp. 213-234. (In Russ.)
16. Cherkashin A. K., Frolov A. A. Sravnitel'no-geograficheskij analiz vysotnogo raspredeleniya geomov raznykh fiziko-geograficheskikh oblastej [Comparative geographical analysis of the altitude distribution of geomorphs in different physical and geographical areas]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Nauki o Zemle*, 2025, vol. 51, p. 107-124. (In Russ.)
17. Chernyh D. V. Provincial'nye i vnutriprovincial'nye landshafty-analogi v bassejne Teleckogo ozera (Russkij Altaj) [Provincial and Intra-Provincial Landscapes- Analogues in the Lake Teletskoye Basin (Russian Altai)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2024, no. 1, pp. 49-55 (In Russ.)
18. Ismail-Zadeh A., Teckley P. *Computational methods for geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 313 p.
19. Slingerland R., Kump L. *Mathematical modeling of earth's dynamical systems: a primer*. Princeton: Princeton University Press, 2011. 231 p.
20. Zavadskas E., Turskis Z. A New Logarithmic Normalization Method in Games Theory. *Informatica*, 2008, vol. 19, no. 2, pp. 303-314.

**Conflict of interests:** The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 22.05.2025

Accepted: 27.02.2026

Фролов Александр Андреевич  
Кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории теоретической географии Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-3098-7259, e-mail: f-v1984@mail.ru  
Черкашин Александр Константинович  
Доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории теоретической географии Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7596-7780, e-mail: akcherk@irnok.net

Alexander A. Frolov  
Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher at the Laboratory of Theoretical Geography, Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3098-7259, e-mail: f-v1984@mail.ru  
Alexander K. Cherkashin  
Dr. Sci. (Geogr.), Prof., Chief Researcher at the Laboratory of Theoretical Geography, Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7596-7780, e-mail: akcherk@irnok.net