

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ

Научная статья

УДК: 911.5/.9

doi: 10.17072/2079-7877-2023-4-6-26

ПОВЕДЕНЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ КАК НАПРАВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Светлана Ивановна Лесных¹, Александр Константинович Черкашин²

^{1,2} Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

¹ tyara@irigs.irk.ru, Author ID: 67776, ResearcherID: AAZ-5292-2020

² akcherk@irnok.ru, Author ID: 58425, Scopus ID: 7003391794

Аннотация. Рассматривается концепция поведенческой географии, определяются ее предмет, основные методы и модели, показывается отличие этого подхода от других направлений разработки теории географической науки. Поведенческая география анализируется в рамках интертеории механизмов регулирования в природе, обществе и хозяйстве – взаимодействия компонентов интегральных геосистем с учетом особенностей географической среды, изменяющейся во времени и пространстве. Территориальный объект изучается в локальном фазовом пространстве относительных признаков, отражающем состояния индивидуальной системы поведения в пространстве и времени без учета особенностей среды. Затем учитывается средовая географическая поправка, привязывающая объект к конкретной территории. Процедуры моделирования основаны на идеях дифференциальной геометрии. С этих метатеоретических позиций поведение отражается с помощью формулы производной Лагранжа и уравнения Эйлера. Различаются холистическое поведение, характеризующее траекторию движения геосистемы в целом, и механическое поведение, учитывающее механизмы взаимодействия частей целого в схемах регулирования, что однозначно определяет предмет исследования интертеории поведения систем. Все это позволяет использовать обширный арсенал методов математического анализа, применяемый в механике, распространив их на другие процессы в природе и обществе. Выделяются стационарные и нестационарные, устойчивые и неустойчивые, автономные и неавтономные системы поведения – последние связаны с воздействием изменчивой окружающей среды и внешним управлением. На примере жизненного цикла лесонасаждений описаны механизмы роста и самоизреживания древостоев в различной географической среде. Предложен алгоритм прогнозного моделирования и картографирования лесов с поправкой на полноту и бонитет насаждений, основанный на подобию временных зависимостей изменения запасов древесины леса. Лесные геосистемы изучаются «в чистом виде» для эталонных лесов, а потом с помощью поправок соотносятся со своей средой, регламентирующей поведение конкретной геосистемы.

Ключевые слова: поведение интегральных геосистем, интертеория поведения, механизмы взаимодействия и регулирования состояния, фазовые пространства, моделирование жизненного цикла лесов

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

Для цитирования: Лесных С. И., Черкашин А. К. Поведенческая география как направление теоретических исследований и моделирования // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 4(67). С.6–26. DOI:10.17072/2079-7877-2023-4-6-26

THEORETICAL GEOGRAPHY

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2023-4-6-26

BEHAVIORAL GEOGRAPHY AS AN AREA OF THEORETICAL RESEARCH AND MODELING

Svetlana I. Lesnykh¹, Alexander K. Cherkashin²

^{1,2} V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russia

¹ tyara@irigs.irk.ru, Author ID: 67776, ResearcherID: AAZ-5292-2020

² akcherk@irnok.ru, Author ID: 58425, Scopus ID: 7003391794

Abstract. The article discusses the concept of behavioral geography, defines its subject, basic methods, and models, shows the difference between this approach and other areas of the theory of geographical science. Behavioral geography is analyzed within the intertheory of regulatory mechanisms in nature, society, and the economy – the interaction of components of integral geosystems that takes into account the peculiarities of the geographical environment as changing in time and space. A territorial object is studied



*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

in the local phase space of relative features that reflects the states of the individual system of behavior in space and time without taking into account the characteristics of the environment. The environmental geographic correction that binds the object to a specific territory is then factored in. Modeling procedures are based on ideas of differential geometry. From these metatheoretical positions, behavior is reflected by the Lagrange derivative formula and the Euler equation. There are distinguished holistic behavior, characterizing the trajectory of the geosystem as a whole, and the mechanical behavior, taking into account the mechanisms of interaction of parts of the whole in the control schemes, which unambiguously determines the subject of the intertheory of the behavior of systems. All this allows us to apply a broad arsenal of mathematical analysis methods used in mechanics, extending them to other processes in nature and society. There are distinguished stationary and non-stationary, stable and unstable, autonomous and non-autonomous behavior systems; the latter are associated with the impact of a variable environment and external management. Through the example of the life cycle of forest plantations, the paper describes the mechanisms of growth and self-thinning of stands in various geographical environments. We propose an algorithm of forecast modeling and mapping of forests with correction for completeness and site quality of plantations, based on similarity of time dependences of change in forest wood reserves. Forest geosystems are studied 'in pure form' for reference forests, and then, with the help of corrections, they are correlated with their environment, which regulates the behavior of a particular geosystem.

Keywords: behavior of integral geosystems, intertheory of behavior, mechanisms of interaction and state regulation, phase spaces, forest life cycle modeling

Funding: the study was financed from the state assignment fund (topic state registration No. AAAA-A21-121012190056-4).

For citation: Lesnykh, S.I., Cherkashin, A.K. (2023). Behavioral geography as an area of theoretical research and modeling. *Geographical Bulletin*. No. 4(67). Pp.6–26. DOI:10.17072/2079-7877-2023-4-6-26

Введение

Продолжение традиции системных исследований [2; 5; 24; 25; 30; 48] и моделирования [17; 29; 46] в географии требует дальнейшего совершенствования методов познания в направлении формирования теоретических основ математического описания территориальных образований как интегральных геосистем, в которых взаимосвязаны природные, природно-ресурсные, социальные, инфраструктурные и техногенные компоненты [4].

Потенциально существует множество теорий для многоаспектного отражения сложной географической действительности, в каждой из которых применяются разнообразные модели и методы, отличающиеся по особенностям системной интерпретации понятий [34; 35]. Каждый из теоретических описаний имеет аналоги в других смежных научных дисциплинах, что придает им сквозной характер и дает возможность разрабатывать сквозные теории (интертеории по А. А. Ляпунову [16]), позволяющие в общих терминах отражать природные, хозяйственные и общественные процессы и явления. Для решения специальных задач с использованием системных моделей необходимо выделить особенности каждой из таких теорий, их понятийный и аксиоматический базис, продемонстрировать их применение в практике географических исследований, исходя из примера функциональных систем [37] и сложных геосистем - геокомплексов [36].

В этой статье рассматривается поведенческая концепция сквозной теории механизмов регулирования, определяются ее предмет, основные методы и математические модели, на абстрактных и конкретных примерах показаны отличия этого подхода от других направлений разработки системных теорий для географической науки.

Современное состояние проблемы

Термин «поведенческая география» возник в 1960-е гг. в США в результате проникновения в географию идей поведенческой (бихевиористской) психологии, основанной на модельной схеме «стимул – реакция». В зарубежной географии (работы Дж. Голда, Р. Голледжа, П. Гоулда и др.) это направление изучает территориальные различия в поведении человека и его ориентирование в пространстве. В современном виде оно объединяет концепции и эмпирические результаты междисциплинарного изучения человеческого разума и деятельности в пространстве, месте и окружающей среде, относящиеся к географии человека, картографии и географической информатике [47]. Исследование, как правило, проводится на уровне территориальных объектов небольших размеров (поселок, город, район) во взаимодействии со специалистами социально-экономической географии [9; 11; 26]. Современная поведенческая география - специализированная дисциплина географии человека, которая уделяет особое внимание когнитивным процессам при формировании пространствен-

*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

ных решений, используя дезагрегированный подход к человеческому поведению, т.е. на уровне отдельного человека [42]. Выделяются три основных предметных направления исследований: когнитивное картографирование, исследование природных опасностей и привязанность к месту [42]. Со стороны радикальных представителей гуманитарной географии появилась мощная критика за формализованное изучение субъективного осмысления человеком пространства. Отчасти из-за этой критики с 1980-х гг. поведенческая география потеряла популярность в рамках географии человека [39].

Поведенческая география в период своего расцвета, основываясь на фактическом материале из разных регионов мира, способствовала теоретико-количественной революции и расцвету пространственного анализа [43; 44], включая гравитационные модели изучения суточных, недельных и иных перемещений людей. Широко использовались методы агентного моделирования и теории игр для системного анализа стратегий поведения, включая поведение лиц, принимающих решения в условиях неопределенности состояния окружающей среды. Эти события изменили методологию поведенческой географии, которая вышла за рамки традиционных пространственных исследований, обеспечивая практически любой масштаб когнитивно-поведенческих проблем, интересных для географов, – от внутренних пространств зданий до понимания космоса [42].

Действительно, в науке допускается очень широкая трактовка поведения – системы внутренне взаимосвязанных действий, осуществляемых объектом во взаимодействии с окружающей средой. Термин «поведение» употребляется применительно к объектам любого уровня организации, например, говорят даже о пространственном поведении электрона в магнитном поле. Поведение — совокупность реальных действий и внешних проявлений жизнедеятельности человека и животных, что имеет огромное значение при адаптации их к окружающей среде [38]. Наука об инстинктивном поведении человека и животных в естественной и искусственной среде и эволюции поведения называется этологией. Можно также исследовать поведение автомобилей на трассе, толпы людей или товарного рынка и т.д.

Наблюдение устойчивой смены состояний геосистем в суточных и годовых циклах стало основанием Н.Л. Беручашвили [6] сформировать представление о поведении геосистем, т. е. то, что изучает раздел ландшафтоведения, – этология ландшафта. Этология ландшафта рассматривает смену состояний как поведенческие акты, связанные с внешними воздействиями и внутренними особенностями геосистемы. Последовательность смены состояний (стеков) отражает их поведенческую динамику в пространстве и во времени [48]. Во всякий момент и в каждом месте геосистема характеризуется возникшими ранее свойствами (признаками) ее компонентов и направленностью процессов их изменения, как результата взаимодействия компонентов и влияния местной среды. В итоге создана ландшафтно-этологическая карта мира [6].

Прямое отношение к исследованию поведения больших систем имеет концепция геоситуационного анализа и моделирования [14; 20]. Одним из аспектов геоситуационного подхода является идея согласования интересов между отдельными элементами системы и между ними и окружающей средой. Любая геоситуация является результатом взаимодействия и столкновения производственных, социальных и природных «интересов». Система рассматривается как относительно устойчивая совокупность отношений между элементами, с помощью которых достигается и поддерживается компромисс, необходимый для ее существования. Геосистема имеет спектр различных взаимосвязанных состояний (геоситуаций), в рамках которого она сохраняет свои основные качества, и выход за указанные границы спектра геоситуаций приводит к качественным изменениям системы, к замене ее другой. Адекватным методом изучения геоситуаций является геоситуационное моделирование, основанное на положениях реляционного подхода, где все отношения подсистем многоуровневого образования описываются в табличной форме [20]. Геоситуационный подход применяется к мо-

*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

делированию пространственно-временных процессов взаимодействия характеристик территории и выступает в роли теоретического обоснования моделирования взаимодействия географических объектов и окружающей их среды.

В работах М.Д. Шарыгина и В.А. Столбова [26] развивается пространственно-поведенческая парадигма, где поведенческая география обращает внимание не только на восприятие человеком, группой людей и обществом окружающего мира, но и на особенности поведения в разных пространствах (личном, семейном, деловом, природном, информационном и др.), уделяя особое внимание формулировке принципов формирования оптимальной среды жизнедеятельности. Человек обучается типичным формам поведения в типичных средовых ситуациях, поэтому ситуации и их восприятие определяют возможные варианты поведения [22], что должно быть характерно для изменения любой системы, детерминированной местными обстоятельствами.

Универсальное (сквозное) понимание поведения систем разного рода в природе и обществе позволяет считать, что предметом исследования поведенческих систем, в том числе и в географии, могут стать любые изменения систем механизмов регулирования. Синтез суждений из различных источников позволяет дать следующие определения, связанные с этими понятиями.

Регулирование – это процесс приведения системы в порядок, в норму, руководствуясь законами взаимодействия и изменения ее частей, а также целенаправленное управляющее воздействие, ориентированное на поддержание равновесия в управляемой системе с помощью регуляторов (норм, правил, целей, связей). Например, – гомеостатическое регулирование состояния организма в биологии или автоматическое управление производственными процессами.

Механизм – это не просто приспособление, обеспечивающее работу технического устройства; это последовательность связанных частей, состояний и изменений, из которых складывается внутреннее устройство любого физического, химического, биологического, экономического, социального и иного наблюдаемого процесса. В частности, экономические механизмы возникают в том случае, если некоторое исходное экономическое явление влечет за собой ряд других, причем для их возникновения не требуется дополнительного импульса – необходимая взаимосвязь естественно возникает между различными экономическими явлениями и вызывает самодвижение, что сближает экономическую трактовку данного понятия с физической [15].

Для естественного развития эко- и геосистем также не требуется регуляции извне, поскольку это саморегулирующиеся системы [1]. Поведенческая экология – направление исследований поведения, включающее изучение влияния на него экологических факторов, с одной стороны, и влияние поведения живых существ на окружающую среду, с другой, основное внимание сосредоточено на взаимодействии (транзакции) между средой и поведением в ней организмов. Ориентация этого подхода холистическая, и в качестве основного инструмента исследования используется естественное наблюдение [7]. В холистическом подходе, в отличие от механистических и редукционистских методов, акцент делается на изучении целостной личности, организма или сообщества живых организмов как неразрывного целого, с оценкой свойств системы в целом с последующим изучением взаимодействия ее частей посредством положительных и отрицательных связей.

Геофизика ландшафта — раздел физической географии, связанный с биогеофизикой, изучает роль физических полей и источников энергии в формировании региональной и локальной структуры геосферы [11]. Эта наука затрагивает вопросы трансформации энергии в биогеоценозах, фотосинтеза и детритных потоков энергии, самоорганизации и саморегулирования геосистем [1].

*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

Такое расширенное приложения моделей механизмов взаимодействия, регулирования и поведения потребовало обобщения понятия «механическая система» со своей терминологией, с соответствующими законами и принципами [35]. Разрабатывается физико-математический подход к созданию теории геосистем с соотношением физических и термодинамических постулатов с основами физической географии и ландшафтоведения [28]. У теории механизмов взаимодействия есть своя специфика описания процессов и явлений. Особенно это касается интерпретации понятия «состояние». Так, функция термодинамического состояния зависит от величины аддитивных экстенсивных и производных интенсивных потенциалов, параметрически определяемых временем и координатами местоположения, которые, как правило, не являются переменными уравнений. Например, состояние характеризуется энергией физической системы, что зависит от ее размера (объема), температуры, давления и других внутренних потенциалов (макроскопических составных частей). Макроскопический подход применим, если число элементов системы велико, и их совокупность (ансамбль) характеризуются суммируемыми показателями типа энтропии, площади и массы объекта, числа элементов, количеством ресурсов и сырья, объемами производства, стоимости продукции, запасами информации и др. Н.Л. Беручашвили [6] считал, что элементарными частями природно-территориального комплекса являются геомассы – аэро-, гидро-, фито-, зоо- лито-, педо- и другие массы вещества, качественно разнородные тела специфического функционального назначения, распределенные по ландшафтным районам и геогоризонтам, чье поведение определяется направленностью и скоростью изменения во времени и перемещения в пространстве.

Перемещение масс отображается в виде уравнений потоков по двум методам изучения движения Лагранжа и Эйлера. В методе Лагранжа изучаются движение (поведение) каждой индивидуальной частицы, её путь, траектория, т.е. линия, по которой частица передвигается. Положение (состояние) каждой частицы в момент времени t задаётся пространственными или признаковыми координатами x, y, z . По методу Эйлера изучается движение элементов в фиксированных точках пространства ξ - состояниях (x, y, z) , например, поток водных масс через гидрометрический створ речного русла, достижение деревьями одновозрастного древостоя конкретного размера (диаметра, высоты), переход растительности в новую фазу сезонного развития. Такое движение рассматривается как динамический процесс смены массой элементов системы своих состояний. Различие двух подходов иллюстрируется движением транспорта: в первом случае прослеживается перемещение отдельной автомашины, во втором – идет мониторинг транспортного потока через таможенный пункт или пост автоинспекции. Поведенческие модели описывают движение по методу Лагранжа, т.е. наблюдают траекторию перемещения каждого элемента системы как результат реализации механизма взаимодействия ее частей, заданных переменными координатами состояния. Всякое отдельное понимание состояния приводит к созданию моделей специальных системных теорий.

Важными в теории поведения являются представления о различного рода перемещениях и циклах движения. Например, в Российской Империи для пользования ямской гоньбой выдавалась «Подорожная грамота», которая содержала реквизиты – пункт отправления, пункт назначения, промежуточные остановки, а также обязательный наказ в пунктах остановок предоставлять верховых лошадей. В современной действительности создаются планы мероприятий – «Дорожная карта» по продвижению системы к целевому состоянию с устойчивым механизмом регулирования ситуации в природе, на производстве и в обществе. Поведение в широком смысле трактуется как жизненные циклы объектов, товаров и инноваций, например, производственный цикл – это последовательность действий по пути превращения исходного сырья в готовую продукцию. В географии развивается теория энергопроизводственных циклов, разработанная Н.Н.Колосовским, Ю.Г.Саушкиным, А.Т.Хрущёвым, И.В. Комаром, И.Л. Савельевой, М.Д.Шарыгиным и другими отечественными экономико-

*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

географами. При моделировании поведения используются такие понятия, как линия жизни, жизненный цикл (путь), маршрут и траектория движения, трек или ход развития, тенденция изменения и др.

Моделирование механизмов поведения

Состояние системы механизмов взаимодействия (СМВ) описывается переменными характеристиками $x_i(\xi, t) \in X_i$ геопространственных координат ξ и времени t или координат $X = \{X_i\}$ признакового пространства, отражающих состояние индивидуальной системы поведения [35]. Элементами таких систем являются набор этих показатели $x = \{x_i(\xi, t)\}$ и их производные изменения $dx_i/d\xi$ и $x_i' = dx_i/dt$ в пространстве ξ и во времени t разного порядка $d^{[n]}x_i/d\xi^{[n]}$ и $d^{[n]}x_i/dt^{[n]}$. Пространство, включающее переменные $x = \{x_i\}$ и их производные, называется фазовым пространством. Пространственные изменения соответствуют градиентам признаков вдоль траектории движения, временные – это скорости ($n=1$) и ускорения ($n=2$) перемещения. Формально СМВ описывается функцией $F(x, dx/dt, \dots)$ связи показателей вида $dx/dt = Ax$, к которому зависимости могут быть сведены путем преобразований переменных $x = \ln z$, $t = \ln t$. В системной функции механизмов поведения $F(x)$ под x понимается набор (вектор) переменных фазового пространства, в котором точка пространства однозначно соответствует состоянию системы $x(\xi, t)$ и может параметризоваться в физическом пространстве ξ и времени t [3]. Координаты в фазовом пространстве $x = \{x_i\}$ называются фазовыми переменными. Такие системы считаются автономными. В неавтономных системах функция $F(t, x(t))$ напрямую зависит от времени t , что бывает, если система преобразуется под влиянием изменчивого внешнего управления или окружающей среды. Траектория точки, изображающей поведение СМВ, называется фазовой кривой, а скорость и ускорение ее перемещения – фазовыми скоростями и ускорениями. Векторные поля фазового пространства показывают, с какой скоростью точка движется вдоль фазовой кривой.

Физический пример СМВ – сила $F(a) = ma$, которая, согласно второму закону механики Ньютона, пропорциональна ускорению $a = d^2x/dt^2$ движения тела; m – масса тела, коэффициент пропорциональности, указывающий, насколько надо увеличить силу, чтобы ускорение возросло на единицу: $m = \partial F(a)/\partial a$. Такие коэффициенты чувствительности в механических системах называют зарядами $q = \{q_i\}$ (электрическими, барионными и т.д.) [34]. Заряды – набор двойственных переменных к переменным фазового пространства, т.е. образует двойственное пространство координат $q_i = \partial F(x)/\partial x_i$ обладающее свой спецификой поведения. В механике движение изображающей точки определяется сравнительно простыми уравнениями Гамильтона, анализ которых позволяет делать заключения о поведении СМВ. В рамках интертеории поведения можно с успехом использовать математические понятия и модели классической механики, проинтерпретировав их в терминах новой области исследований механизмов регуляции.

В общественной сфере заряды характеризуют направленность действия различных сил на поведение системы типа своеобразных интересов, ориентации стимулов – сильных побудительных мотивов, внутренних или внешних параметров, определяющих величину и направление реакции, часто определяющих относительную скорость изменений [35]. В поведенческой экономике стимул составляет основу поведения человека, организаций и производств. В финансово-экономических отношениях, как параметры чувствительности, заряды определяют чувство собственности, направленность на сохранение и преумножение капитала, показатели производства и потребления, изменение спроса и предложения в расчете на единицу товара и потребителя, потребности и способности, наконец, личные, общественные и национальные интересы, так или иначе завязанные на проблемы собственности и суверенитета.

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

Метатеоретическое объяснение

Интертеория поведения описывает разнообразные перемещения целостного объекта в пространстве и времени и фазовом пространстве характеристик системы как результат работы механизма взаимодействия ее частей «в чистом виде», т.е. без учета состояния и изменения среды. Средовое влияние рассматривается по общему принципу для разных интертеорий на метатеоретическом уровне, использующем математические знания для решения задач моделирования с учетом естественных ограничений на вид формул. Используются процедуры расслоения дифференциальной геометрии, основываясь на представлении о дифференциале и производной, как базовой конструкции дифференциального исчисления. В каждой точке $x(t)$ фазового пространства $x(t)$ изменение неавтономной системной функции $F(t, x(t))$ многообразия связи фазовых переменных $x(t) = \{x_i(t)\}$, зависящих от времени t , определяется полным дифференциалом:

$$dF(t, x(t)) = \frac{\partial F}{\partial t} dt + \frac{\partial F}{\partial x_1} dx_1 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_i} dx_i + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} dx_n, \quad a_i = \frac{\partial F(t, x(t))}{\partial x_i} \quad (1)$$

Из нее выводится формула субстанциональной производной (производной Лагранжа), применяемой в теории сплошной среды:

$$\frac{dF(t, x(t))}{dt} = \frac{\partial F(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial F(t, x)}{\partial x_1} v_1 + \dots + \frac{\partial F(t, x)}{\partial x_i} v_i + \dots + \frac{\partial F(x)}{\partial x_n} v_n = \frac{\partial F(x)}{\partial t} + a \cdot v, \quad v_i = \frac{dx_i(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $a = \{a_i\}$ – двойственные переменные, частные производные, чувствительности изменения функции $F(t, x(t))$ при изменении переменной $x_i(t)$ на единицу, конечные действительные числа, определяющие «вес» каждого приращения dx_i ; $v = \{v_i\}$ – скорости или пространственные градиенты изменения переменной $x_i(t)$ по параметру t времени или пути, пройденном в географическом пространстве. Если трактовать $F(t, x(t))$ как энергию, а $x_i(t)$ – в качестве пространственных координат, то a_i в классической механике соответствует импульсу движения; если как силу, то a_i считается зарядом.

Уравнения (1)–(2) описывают, как меняется система $F(t, x(t))$ под влиянием различных стимулов $x_i(t)$ со временем t или от расстояния ξ , например, глубины залегания грунтовых вод в зависимости от расстояния ξ до уреза воды водохранилища [10]. Г.Н. Высоцкий [8] на конкретном примере показал, какие важные выводы могут быть сделаны опытным исследователем при поездках по железной дороге путем наблюдений из окна вагона за ландшафтами с их заверкой при остановках на станциях. Уравнения (1)–(2) демонстрируют возможность при сравнительном изучении поведения ландшафтов перевести пространственные закономерности во временные, если удастся найти соответствия скорости и градиента: $dx_i/dt = K dx_i/d\xi$. Сейчас есть возможность наглядно проследить внутриконтинентальную и высотно-поясную трансформации природы и хозяйства регионов по пути следования поезда из Москвы на Урал, в Западную и Восточную Сибирь и на Дальний Восток на многочисленных интернет-сайтах [19], где при монокулярном зрении можно воспринять не только изменение, но и глубину ландшафтного пространства.

Уравнения (1)–(2) отражают поведение системы в локальной окрестности $dx = \{dx_i\}$ точки $x_0 = \{x_{0i}(\xi, t)\}$. Принимается метатеоретическая гипотеза, что уравнения справедливы в более широкой окрестности – касательного слоя $dx \rightarrow \Delta x(t) = x(t) - x_0(t) = y(t) = \{y_i(t)\}$, $y_i(t) = x_i(t) - x_{0i}(t)$ и $dF(t, x(t)) \rightarrow \Delta F = F(t, x(t)) - F(x_0(t)) = f(y(t))$. Здесь $y(t) = \{y_i(t)\}$ – система локальных координат с центром в подвижной или стационарной точке $x_0(t) = \{x_{0i}(t)\}$, когда $f(0) = 0$. Тогда наблюдаемое поведение системы опишется соотношением [33]

$$F(t, x(t)) = f(y(t)) + F(x_0(t)), \quad (3)$$

где $f(y(t))$ отражает поведение системы в касательном слое типа $F_0 = F(x_0(t))$. В зависимости от содержания решаемой задачи переменная $F(x_0(t))$ воспринимается по-разному: 1) начало ко-

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

ординат фазового пространства; 2) начальное состояние процесса; 3) характеристика окружающей среды; 4) ошибка наблюдения; 3) сигнал на входе процесса (стимул); 5) норма поведения; 6) равновесное состояние; 7) характеристика партнера по парному взаимодействию и др. Локальные координаты $y(t)=\{y_i(t)\}$, используемые в расчетах, выражают относительность фазовых переменных типа относительности расстояния и скорости в физике или средовой относительности в географии. В дальнейшем $F(x_0(t))$ и $x_0(t)$ будем преимущественно трактовать как оценку состояния географической среды, резкая смена которой связывается с явлением трансформации системы (рис.1).

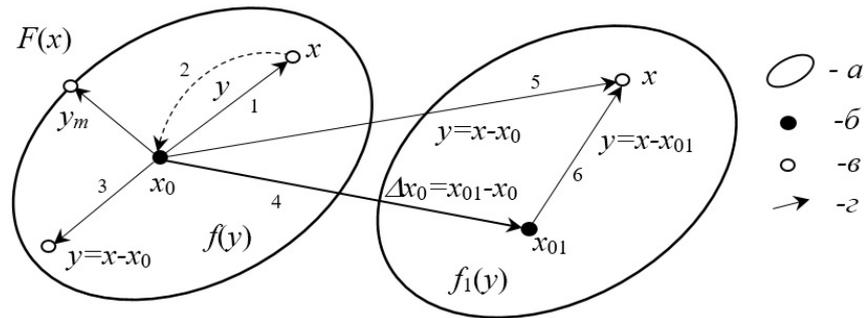


Рис.1. Векторно-графическая схема расслоения фазового пространства x на многообразии $F(x)$ на касательные слои $f(y)$ и $f_1(y)$ с точками касания x_0 и x_{01} – центрами локальных координат $y(t)=x(t) - x_0$: a – границы ядра слоя с предельным отклонением y_m ; b – положение центров (инвариантов) слоя x_0 ; v – переменные положения (состояния) поведенческой системы; z – стрелки-векторы, отражающие разные тенденции поведения: 1 – вынужденные отклонения от начального состояния и положения равновесия; 2 – устойчивая тенденция восстановления равновесия (обратная связь); 3 – неустойчивая тенденция отклонения от равновесия (прямая связь); 4 – явления трансформации, связанные с изменением инварианта слоя $\Delta x_0=x_{01}-x_0$; 5 – положение системы в новом слое в старых координатах $y(t)=x(t) - x_0$; 6 – то же в новых координатах $y(t)=x(t) - x_{01}$.

Fig.1. The vector-graphic scheme of the bundle of phase space x on manifold $F(x)$ into tangent layers $f(y)$ and $f_1(y)$, with tangent points x_0 and x_{01} being the centers of local coordinates $y(t)=x(t) - x_0$. Symbols: a - boundaries of the layer core with limit deviation y_m ; b - the position of centers (invariants) of layer x_0 ; v - behavioral system position (state) variables; z - arrow vectors reflecting different behavior trends: 1 - forced deviations from the initial state and equilibrium position; 2 - stable trend of equilibrium recovery (feedback); 3 - unstable trend of deviation from equilibrium (direct link); 4 - transformation phenomena associated with a change in the invariant of the layer $\Delta x_0=x_{01}-x_0$; 5 - the position of the system in the new layer in the old coordinates $y(t)=x(t) - x_0$; 6 - the same in the new coordinates $y(t)=x(t) - x_{01}$.

Соотношения (1)–(2) при постоянстве средовых характеристик $F(x_0(t))$ допускают замену $F(t,x(t)) \leftrightarrow f(y(t))$. При переменной среде $x_i = y_i + x_{0i}$ и $v_i = v_{iy} + v_{0i}$ прямая зависимость $F(t,x(t))$ от времени t переносится на изменчивость $F(x_0(t))$:

$$\frac{\partial F(t,x)}{\partial t} = \frac{\partial F(x_0(t))}{\partial t} = \frac{\partial F(x_0(t))}{\partial x_{01}} v_1 + \dots + \frac{\partial F(x_0(t))}{\partial x_{0i}} v_i + \dots + \frac{\partial F(x_0(t))}{\partial x_{0n}} v_n \quad (4)$$

Математические формулы (1)–(4) не являются уравнениями, предполагающими наличие равенства между априорно независимыми переменными и функциями. Необходимо добавить в правую часть равенства (2) неизвестную функцию $G[y, f(y)]$ от функции $f(y(t))$ и смещенных переменных $y = x - x_0$, что дает два связанных дифференциальных уравнения в полных и частных производных для моделирования автономных систем регулирования:

$$a) \frac{df(y(t))}{dt} = G[y, f(y)], \quad b) \frac{\partial f(y)}{\partial y_1} v_1 + \dots + \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} v_i + \dots + \frac{\partial f(y)}{\partial y_n} v_n = G[y, f(y)]. \quad (5)$$

Функция $G[y, f(y)]$ раскладывается в ряд Тейлора, длина которого определяется сложностью решаемой задачи описания механизмов взаимодействия:

$$G[y, f(y)] = \frac{\partial G[y, f(y)]}{\partial f(y)} f(y) + \frac{\partial G[y, f(y)]}{\partial y} y + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G[y, f(y)]}{\partial f^2(y)} f^2(y) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G[y, f(y)]}{\partial y^2} y^2 + \dots \quad (6)$$

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

Два первых слагаемых определяют линейную схему влияния $G[y, f(y)] = \alpha y + \beta f(y)$. Два последующих дают квадратичную форму влияния, которая описывает парные взаимодействия, например, в механизмах химических реакций и конкурентных отношениях видов в сообществах, что, в частности, приводит к логистическим кривым поведения.

Уравнения (5) описывают явления в чистом виде в относительных переменных, постулируя метатеоретические связи значений фазовых переменных $f(y(t))$, на основе которых, согласно (3), моделируются наблюдаемые закономерности $F(t, x(t))$, учитывающие изменчивую среду $F(x_0(t))$. Уравнение (5а) отражает холистический подход к изучению и моделированию поведения целостной системы $f(y(t))$, а уравнение (5б) – механический подход к исследованию механизма $f(y(t))$ взаимодействия ее частей с относительными характеристиками $y(t) = \{y_i(t)\}$, $v(t) = \{v_i(t)\}$.

Послойное метатеоретическое исследование природных или социальных явлений в относительных переменных $y(t)$ и функциях $f(y(t))$ выделяет ряд замечательных математических свойств для аналитических исследований, в частности, равенство производных скоростей и зарядов $v_i(y) \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} = \frac{\partial [v_i(y)f(y)]}{\partial y_i}$ в локальной области. Исходя из гипотезы, что уравнения справедливы в широкой окрестности касательного слоя в локальных координатах $y(t) = \{y_i(t)\}$, выводится уравнение для автономных систем [33]

$$f(y) = a_1 y_1 + \dots + a_i y_i + \dots + a_n y_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} y_i, a_i = \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} = \frac{\partial F(t, x(t))}{\partial x_i}. \quad (7)$$

Эта функция (уравнение Эйлера) отражает связи фазовых переменных в виде однородных функций $f(\lambda y) = \lambda f(y)$ первого порядка. Предполагается, что неизвестную функцию $G[y, f(y)]$, фигурирующую в соотношениях (5)–(6), также необходимо искать в классе суперпозиции однородных функций; $G[\lambda y, f(\lambda y)] = G[\lambda y, \lambda f(y)] = \lambda G[y, f(y)]$. Это означает, что вид функций не зависит от масштаба фазовых переменных, поэтому фазовые кривые при преобразовании масштаба не изменяются, только положение разномасштабных систем в фазовом пространстве на этих кривых будет иное. Таким образом, формулируется метазакон сохранения законов теории механизмов поведения, что существенно для географических исследований, где иерархия геосистем является важной особенностью, и на каждом уровне действуют одинаковые законы. Только эти законы реализуются в идеальном фазовом пространстве относительных переменных y , когда переход к исходным переменным $x = y + x_0$ превращает системные зависимости из однородных в неоднородные, учитывающие качество географической среды. Также заметим, что при таком подходе законы поведения не зависят от выбора размерности величин y фазового пространства.

Переход от выражения (7) к исходным переменным дает соотношение системной $F(x)$ и средовой $F(x_0)$ функций:

$$F(x) - \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(x)}{\partial y_i} x_i = F(x_0) - \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(x_0)}{\partial y_i} x_{0i}, y_i = x_i - x_{0i}. \quad (8)$$

В соответствии с этой формулой в постоянной среде x_0 при $x = x_0$ система находится в равновесии $F(x) = F(x_0)$ со средой. При изменяющихся значениях фазовых переменных x , x_0 и функций $F(x)$, $F(x_0)$ изменения в поведении систем, согласно уравнению (8), происходят симметрично и сбалансированно, когда минимизируются отклонения $y = x - x_0$.

В этом отношении интересен следующий поведенческий эффект. Запечатление (импринтинг) в этологии и психологии – это специфическая форма закрепления в памяти признаков внешних объектов x_0 при формировании или коррекции врождённых поведенческих актов следования зрелорождённых птенцов или детёнышей за родителями или другими увиденными в

Теория и методология географии

Лесных С.И., Черкашин А.К.

начале самостоятельной жизни объектами среды. В опытах Р.Пеоша [13] механический робот (см. рис.1) совершал случайные движения $x_0(t)$ в экспериментальной зоне, где вылуплялись инкубаторные цыплята x , которые, благодаря импринтингу, признавали робота за свою "мать" и следовали за ним ($y=x-x_0 \rightarrow \min$), когда их выпускали из прозрачного бокса $x=x_0$. Это напоминает вращение Земли вокруг Солнца, перемещающегося вокруг центра галактики под действием сил притяжения. Цыплят, после трех дней совместного пребывания с роботом, убирали. В их отсутствии робот просто совершал непредсказуемые движения $x_0(t)$. Когда цыплят возвращали в прозрачный бокс x_0 без возможности следовать за роботом, робот сам проводил больше времени у ящика x_0 с цыплятами x , т.е. минимизировал расстояние $y=x-x_0$.

Проявляющийся в этом примере метатеоретическое равенство (8) связи объекта и его среды соотносится с принципом наименьшего принуждения Гаусса [32], согласно которому мера принуждения $y^2 \rightarrow 0$ складывается $y=x-x_0$ из истинного x и свободного x_0 движения. Например, в эволюционном поведении ландшафта отклонения y оцениваются степенью факторального отличия каждой фации от зональной нормы x_0 (серийностью) и тенденцией, выраженной в снятии факторального принуждения $y \rightarrow 0$ с эквивиальным результатом $x=x_0$ с превращением в идеале всех фаций в коренные равнинные фации x_0 с учетом возможных климатических и хозяйственных трансформаций $x_0 \rightarrow x_{01}$ (см. рис.1).

В природе это наглядно прослеживается в средовых изменениях годового прироста деревьев, в экономике – в волатильности финансовых показателей, причины которых объясняются средствами технического анализа рядов данных $x(t)$ или фундаментального анализа разноразмерной финансово-экономической среды, которую необходимо принимать во внимание при разработке управленческих решений. Взаимная адаптация – основное правило взаимодействия природных и социально-экономических геосистем и их среды, нацеленное на раскрытие географического потенциала территории, адекватное заполнение пространства. Это правило наглядно отображено в концепциях сотворчества [25] и коэволюции [17] человека и природы. Ранее К.Зауэр [49] разработал морфологическую концепцию ландшафта, который рассматривался как средство приспособления человека к окружающей среде, формирования культурного ландшафта как результата деятельности человека на фоне природной среды. Культурный ландшафт приспособливает природный ландшафт с помощью культурных групп, и в итоге посредством культуры человек сам формирует окружающую его среду.

Теория и модели регулирования

Особенность моделей механизмов регулирования поведения систем – использование в фазовом пространстве представления данных в качестве фазовых переменных кроме относительных расстояний y вектора относительных скоростей $v=y'$, ускорений $a=y''$ и т.д. Умножение этих фазовых переменных на соответствующие заряды q дают представление об обобщенных силах взаимодействия: $F_y=q_y y$, $F_v=q_v y'$, $F_a=q_a y''$. Системные функции слоя $f(y)$ являются равнодействующей этих сил $f(y)=F_y+F_v+F_a$. При $f(y)=0$ действия этих сил сбалансированы, откуда получаются равенства, определяющие качество поведения систем; для парного воздействия:

$$a) q_v y' = -q_y y, \quad б) q_v y'' = -q_y y, \quad в) q_v y''' = -q_y y'. \quad (9)$$

Равенство (9а) широко распространено в научных приложениях. Оно отражает однородную связь фазовых переменных $q_v \lambda y' = -q_y \lambda y$, не зависящую от масштаба явления. Оно соответствует уравнению $y' = ky$, где $k = -q_y/q_v$ – коэффициент замещения зарядов разных сил. В этом уравнении расстояние y можно трактовать как расстояние между любыми галактиками и как изменяющееся расстояние до одной начальной, особой, сингулярной точки касания мирового многообразия, из которой начинался Большой взрыв. К числу таких уравнений относится космологический закон Хаббла расширения Вселенной – увеличения расстояния y между галактиками:

*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

$y' = Hy$, где $k = H = 66 - 78$ км/с на мегапарсек – константа Хаббла, определяющая характерный возраст Вселенной $\tau = 1/H$. В настоящее время считается, что такое поведение (разбегание) галактик определяется балансом действия сил со стороны темной энергии $F_v = q_v y'$ и силы гравитационного притяжения $F_y = q_y y$; последнее в данном случае напоминает закон Гука – малая деформация y упругого тела пропорциональна приложенной к этому телу силе F_y (q_y – коэффициент упругости). При предельных нагрузках $F_{ym} = q_y y_m$ с деформацией, превышающей y_m , физическое тело разрушается. Аналогично выделяется радиус сферы Хаббла $y_m = c/H$, определяемой предельной скоростью c – скоростью света [45]. Фазовая зависимость $y'(y)$ равенства $y' = ky$ представляет собой прямую линию с наклоном k , ограниченную сверху и снизу предельными значениями отклонений y от значения $y=0$ (центра слоя).

Нахождение системы в определенных границах обеспечивает ее целостность, устойчивость существования и поведения (см. рис. 1). В рамках концепции коэволюции природы и человечества обсуждаются вопросы «предельной черты» – существования состояний биосферы, переступить которые человечество не должно ни при каких обстоятельствах [17]. Существование ограничений в поведенческой географии связано с представлением о территориальности – свойстве (познания и поведения) человека, общества и государства, демонстрируемое по отношению к окружающей его среде обитания, на которую он предъявляет права собственности, охраняет, защищает и использует частным образом для жизни и деятельности в соответствии с социальными нормами и правилами; нарушение границ территории другими субъектами деятельности не допускается. В этом определении сочетаются понятия количественной интертеории поведения и качественной (общей) интертеории деятельности, объединяющей знания от межличностных этических отношений людей до политических межгосударственных отношений. Это другой аспект, иной слой интертеоретического моделирования.

В науке существует множество примеров моделей поведения, соответствующих уравнению $y' = ky$, которое при $k > 0$ описывает взрывной характер роста типа модели роста численности населения Мальтуса. Гораздо шире распространены модели варианта $k < 0$ возвращения характеристик системы в устойчивое равновесное состояние $y = 0$. Сюда относятся модели радиоактивного распада вещества, разрядки электрического конденсатора, выравнивания горного рельефа с созданием равнинного пенеплена в географическом цикле развития поверхности суши, закона Ньютона охлаждения физического тела, согласно которому температура тела будет приближаться по экспоненте к температуре окружающей среды, уравнения роста растений и животных до предельного размера, экономические модели Солоу и Рамсея взаимовлияния капиталовооруженности предприятий и потребления населения. В зависимости от величины k возможны варианты трендов развития, например, в эволюции организмов [21]: ароморфозы выражаются в прогрессивных эволюционных изменениях строения ($k > 0$); идиоадаптации соответствуют малозначимым эволюционным изменениям, связанным с мелкими приспособлениями к конкретным условиям окружающей среды ($k = 0$); общая дегенерация связана с регрессивными изменениями ($k < 0$). Основной эволюционный механизм биологических видов — это естественный отбор, выживание организмов, наиболее приспособленных к окружающей среде. Наличие сходства в поведении физических и нефизических систем позволяет использовать для расчетов аналоговый компьютер (АВМ) — вычислительную машину, которая представляет значения и связи данных при помощи аналоговых физических параметров и внутренних настроек устройства АВМ.

Уравнение (9б) моделирует более сложную картину поведения через борьбу сдерживающих F_y и раскачивающих F_a сил взаимодействия: $y'' = ky$, $k = -q_y/q_v$ – коэффициент замещения зарядов. При $k < 0$ в системе возникают периодические колебания, ограниченные амплитудой движения типа колебания маятника, появления периодических циклов подъёмов и спадов производства мировой экономики, волн массового размножения организмов, заболеваемости населения и преступности, обусловленных внутренними движущими силами сис-

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

тем механизмов взаимодействия. При $k > 0$ уравнение (96) описывает переходные процессы из одного состояния системы в другое во времени t и в пространстве ξ . В последнем случае интересна модель В.В.Суханова [27] распределения видового обилия по литорали гряды Курильского архипелага, отражающая в виде «цепной линии» изменение представительства видов северной (с о. Камчатка) и южной (с о.Хоккайдо) фауны на островах.

Отмеченные закономерности поведения оформляются в постулаты интертеории механизмов регулирования. Интертеория создается как аксиоматическая дедуктивная система исходных понятий и предложений – специальная интерпретация (\sim) терминов и аксиом общей теории систем (ОТС) [34; 35; 40]:

$$1) S \equiv C, 2) \Delta S \equiv C, 3) \Delta S_i \equiv D_i. \tag{10}$$

Здесь символ (\equiv) соответствует тождеству (изоморфизму) понятий; S – универсальной системе (универсуму), объединяющей системы S_i разного рода; ΔS – универсальному изменению S , включающему все изменения ΔS_i ; D – действию всех действий D_i систем S_i . Термином C обозначается качество объективного инвариантного существования, сохранения свойств систем при преобразованиях, например, истинности суждений в логических доказательствах или скорости света во всех физических системах отсчета. Специфика системной интертеории зависит от того, как понимается инвариантное качество, которое есть во всех универсальных моделях поведения систем данного рода и их изменениях ($S \equiv C, \Delta S \equiv C$).

Универсальная система $S \sim X$ – фазовое признаковое пространство $X = \{X_j\}$ состояния $x = \{x_i\} \in X$ поведения систем и производных x_i разного порядка (скорости, ускорения, градиентов и т.д.). Понятие «производная» трактуется в разных не только математических смыслах, но и, прежде всего, в понимании Лагранжа: происхождение биологических видов, производство в экономике, произведение в творчестве, произвол в политике и т.д.

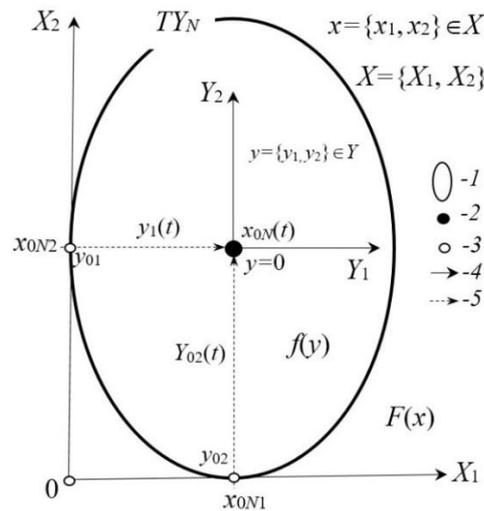


Рис.2. Схема строения отдельного слоя поведения $f(y)$ расслоенного $TU = \{TY_j\}$ фазового пространства X на многообразии $F(x)$ с переменными координатами точки касания $x_0(t)$ – центра локальных координат $y(t) = x(t) - x_0(t)$: 1 – границы ядра слоя с предельными отклонениями y_{1m} и y_{2m} ; 2 – переменное положение центра (инварианта) слоя $x_0(t)$; 3 – начальные положения (состояния) поведенческой системы; 4 – тотальные X и локальные Y фазовые координаты; 5 – частные тенденции поведения
Fig.2. The structure scheme of a separate layer of behavior $f(y)$ of the bundle $TU = \{TY_j\}$ of phase space X on manifold $F(x)$ with variable coordinates of tangent point $x_0(t)$ being the center of local coordinates $y(t) = x(t) - x_0(t)$. Symbols: 1 – boundaries of the layer core with limit deviations y_{1m} and y_{2m} ; 2 – the variable position of the center (invariant) of layer $x_0(t)$; 3 – initial positions (states) of the behavioral system; 4 – total X and local Y phase coordinates; 5 – particular trends in behavior.

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

Универсальная система $\Delta S \sim Y$ – фазовое $Y = \{Y_i\}$ векторное расслоенное пространство $TU = \{TY_j\}$ относительных признаков $y_j = \{y_{ji}\}$ поведения систем и производных признаков y_{ji} разного порядка. С учетом послышной дифференциации $TU = \{TY_j\}$ координаты локального фазового пространства обозначим $y = \{y_i\}$, а производные – y' , y'' и т.д. независимо от того – это набор (вектор) $y = \{y_i\}$ переменных или отдельная переменная величина $y = x - x_0$ в касательном слое с центром x_0 (см. рис. 2) расслоения многообразия $F(x) = f(y) + F(x_0)$ в фазовом пространстве признаков координат $x \in X = \{X_i\}$. Заряды и импульсы $a = \{a_i\}$ формируют двойственное фазовое пространство.

Инвариантом C является сходная структура пространств X и Y , привязанная к началу системы тотальных $x = \{x_i\} = 0$ и локальных $y = \{y_i\}$ координат поведенческих характеристик объектов; начало локальных координат слоя $y = 0$ задается координатами центра слоя $x = x_0$ – значениями нормы (моды, типа) его существования. Локальное фазовое пространство Y – такое же, как тотальное пространство X , но очень маленькое, выраженное в относительных характеристиках $y = \{y_i\}$ геосистем. Подобие систем тотальных и локальных координат ($\Delta S \equiv S$) демонстрирует эффект самоорганизации, который в частном случае наблюдаем в соотношении прямой и обратной связей фазовых координат $y' = \pm ky$.

Точка x_0 многообразия $F(x_0)$ – своеобразное выражение идентичности системы, эпицентр существования и особенностей поведения системы, из которого следуют все свойства слоя. Универсальное изменение $\Delta S \equiv C$ в фазовом пространстве и слое интерпретируется как граница их ядра C , в частности, в слое – как предел (норматив) допустимых изменений $y_m = \pm C/k$ (см. рис.1 и 2).

К системным формулам $\Delta S_i \equiv D_i$ относятся уравнения вида (5) и (7). В последнем случае локальная функция $f(y)$ трактуется как производная функция $f(y) \sim df/dt$ типа отношений «стимул-реакция» в поле действия различных сил природы и общества, зависящих только от относительных характеристик y . Для перевода модели в исходные показатели используют типичные преобразования $F(x) = f(y) + F(x_0)$, $x = y + x_0$.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим закономерности поведения систем на примере жизненного цикла древостоев от формирования молодых насаждений до спелых и перестойных лесов как целого с учетом механизмов роста и самоизреживания древостоев разных пород в различной географической среде.

В качестве модели поведения рассматриваются уравнения баланса активизирующих $F_v = q_v y'$ и сдерживающих сил $F_y = q_y y$ сил ($F_v = F_y$) наподобие работы конденсатора, в частности, конденсации солнечной энергии в растительном покрове, изучаемой в рамках биогеофизики Земли [31]. Сравниваются силы зарядки F_v и разрядки F_y энергии биомассы как одной из разновидностей геомасс ландшафта: $q_v y' = q_y y$, где q_v – заряд, равный энергии, необходимой для образования единицы биомассы; q_y – заряд, равный ежегодному расходу энергии, требуемой для жизнедеятельности единицы биомассы. Отсюда получаем равенство $y' = -ky$, где $k = -q_y/q_v$ – коэффициент замещения зарядов. В силу однородности этого уравнения соответствующий ему закон не изменяется при умножении переменных на масштабный коэффициент K : $(Ky)' = -kKy$.

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

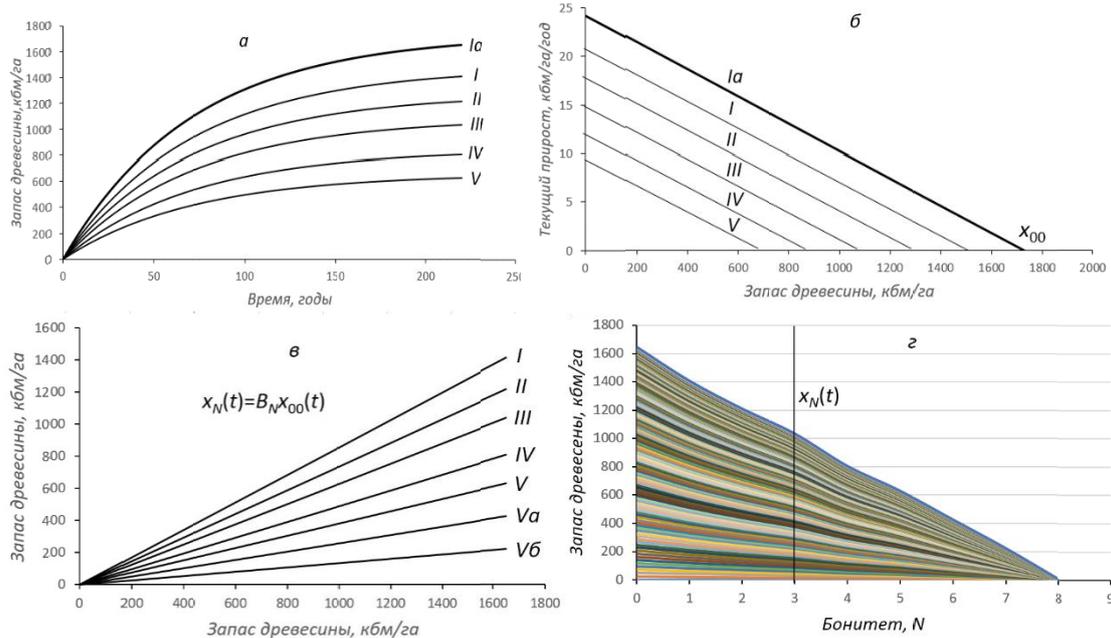


Рис.3. Временные кривые (а) и фазовые линии (б) изменения текущего прироста и запаса биомассы сосновых насаждений разных бонитетов Ia, I, II, III, IV, V; в- зависимости изменения запасов разных бонитетов от запаса биомассы лесов Ia бонитета; г - вариация запасов древесины во времени и по бонитету, вертикальная линия - срез (слой) изменения запаса насаждений $x_N(t)$ бонитета III (см. график а, линия III)

Fig.3. Time curves (a) and phase lines (б) of changes in the current growth and biomass reserve of pine plantations of different site qualities Ia, I, II, III, IV, V; в - dependence of changes in the reserves of different site qualities on the stock of forest biomass of Ia site quality; г - variation of wood reserves over time and by site quality, vertical line - section (layer) of change in the stock of plantations $x_N(t)$ of site quality III (see graph a, line III)

Data: ‘General tables of the growth progress of pine plantations’ compiled by prof. A.V. Tyurin [31]

Решением уравнения $y' = -ky$ при начальных условиях $y(t) = y(0) = y_0$ является экспонента $y(t) = y_0 \exp(-kt)$, значение которой при $t \rightarrow \infty$ стремится к $y(t) = 0$, когда система находится в равновесном состоянии. Начальное отклонение $y(t) = y_0$ состояния от равновесного $y = 0$ равно $y(0) = y_0$.

Изменение запасов биомассы $x(t)$ в таблицах хода роста насаждений исчисляется в кубометрах объема древесины древостоя в расчете на 1 га площади леса; эта величина $x(t)$ изменяется с возрастом древостоя t (рис.3,а). Определим фазовую переменную $y(t)$ как разность $y(t) = x(t) - x_0(t)$ текущего запаса древостоя $x(t)$ и потенциального предельного запаса $x_0(t)$, зависящего от качества географической среды (бонитета) и ее изменчивости во времени. Тогда накопление запаса описывается дифференциальным уравнением $x' - x_0' = -k(x - x_0)$ с решением $x(t) = y(t) + x_0(t) = y_0 \exp(-kt) + x_0(t)$. Это уравнение отражает одну из форм симметрии изменения геосистемы и ее среды (8): $x' + kx(t) = x_0' + kx_0(t)$.

Поскольку в начале процесса $x(t) = x(0) = 0$, то $y_0 = -x_0(0)$:

$$x(t) = -x_0(0) \exp(-kt) + x_0(t). \tag{11}$$

Это уравнение показывает, как возрастает запас $x(t)$ со временем (рис.3,а) при разных условиях среды $x_0(t)$. Максимальный прирост запаса при постоянном x_0 наблюдается в начале роста $y'(t) = kx_0$. При $t \rightarrow \infty$ будет $x(\infty) = x_0(t)$ – максимальный запас насаждения, отражающий лесорастительные условия - бонитет Ia, I - V и др., индицируемый числами $N = 0$ для Ia, 1 для I и т.д. Постоянный максимальный запас $x_{0N} = x_{0N}(0)$ зависит от бонитета N , равен для сосновых лесов Ia 1728 кмб/га и снижается с величиной N : $x_{0N} = 1728 - 213,8N$. Коэффициент относительной скорости роста $k = 0,014/\text{год}$ примерно одинаков для всех бонитетов сосновых насаждений [31].

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

Фазовая картина зависимости x' (x) при постоянных x_{0N} и k показана на рис.3,б: $x'_{N}(t) = k[x_{0N} - x_{N}(t)] = -k y_{N}(t)$. Она представлена параллельными линиями, соответствующими разным максимальным запасам x_{0N} и бонитетам N . Эти линии – слои зависимости $x_{N}(t)$ для разных бонитетов. Базой расслоения считаются дискретные точки x_{0N} оси ординат (рис.3,б) $x_{0N} = 1728-213,8N$, или $x_{0N} = x_{00} - \Delta x_{0N}$. Каждая линия фазового пространства соответствует зависимости запаса $x_{N}(t)$ от времени (см. рис.3,а). В каждом слое N согласно системе аксиом (9) есть свой инвариант состояния ($S \equiv C$) - x_{0N} , инвариант изменения (поведения) ($\Delta S \equiv C$) - $x'_{N}(t) = k x_{0N} = C_N$, откуда находится значение постоянного коэффициента $k = C_N / x_{0N}$ и закон текущих изменений ($\Delta S_i \equiv D_i$) - $y'_{N}(t) = -k y_{N}(t)$, определяемых силой сдерживания $-k y_{N}(t)$.

По причине однородности последнего равенства $\lambda y'_{N}(t) = -k \lambda y_{N}(t)$ оно выполняется для разного масштаба переменных, поэтому $x'_{N}(t) = B_N x'_{0}(t)$, $x_{N}(t) = x_{00}(t) = b_N x_{00}(t)$, где $B_N = x_{0N} / x_{00}$ – прямой и $b_N = 1 / B_N$ – обратный бонитировочные коэффициенты. Постоянный коэффициент B_N переводит эталонную кривую роста $x_{00}(t)$ для насаждений Ia бонитета в кривую $x_{N}(t)$ для бонитета N (рис.3, в), а коэффициент b_N – обратно преобразует $x_{N}(t) \rightarrow x_{00}(t)$ в эталонный вид, что позволяет сравнивать различные кривые, сводить зависимости к однотипному виду (проводить мета-анализ) (см. рис.3). Аналогично учитывается полнота p при моделировании динамики лесонасаждения: $x_{Np}(t) = p x_{N}(t) = p B_N x_{00}(t)$, где $x_{N}(t)$ – соответствует кривой роста нормального лесонасаждения ($p=1$). В итоге расчеты по данной модели сводятся к анализу хода роста эталонных лесов $x_{00}(t)$ (рис.3, з). Многообразие среды в лесоведении задается бонитировочными коэффициентами: $B_N = 1 - \phi N$, где $\phi = \Delta x_{0} / x_{00} = 0,124$ не зависит от бонитета.

В базовом соотношении $y' = -k y$ коэффициент k зависит от типа лесобразующей породы, например, для ели $k_e = 0,012$. Переход от k к k_e формально выражается поворотом фазовой линии $y'(y)$ вокруг точки $y=0$ (см. рис. 2). Это свойство и масштабная инвариантность законов выражают свойства симметрии связей: аффинной симметрии для пространства X и центральноаффинной для пространства Y . Иными словами, тенденции изменения запаса лесов разных пород и местоположений подчиняются одним и тем же законам с точностью до аффинных преобразований (средового смещения, масштабного растяжения, видового поворота), поэтому эти тенденции можно сравнивать, приводить к общему виду.

При моделировании процесса самоизреживания древостоя ссылаемся на то же соотношение $y' = -k y$, где в данном случае принимается $y(t) = x(t) - x_0(t) = \ln P(t) / P_0(t)$, $x(t) = \ln P(t)$, $x_0(t) = \ln P_0(t)$; $P(t)$ – текущая плотность древостоя, $P(0)$ – начальная плотность, $P_0(t)$ – конечная, эквивалентная плотность древостоя (шт./га). Величина $x(t) = \ln[P(t) / P_0(t)]$ имеет смысл интегрированной безопасности для дерева: просуществовать до возраста t в условиях внутривидовой конкуренции.

Скорость изменения $x'(t)$ отражает риск существования, интенсивность самоизреживания древостоя. По аналогии с уравнением (9) находим

$$\text{а) } \ln P(t) = \ln[P(0) / P_0(0)] \exp(-kt) + \ln P_0(t), \text{ б) } P(t) = P_0(t) [P(0) / P_0(0)]^{\exp(-kt)}. \quad (12)$$

Уравнение (10,б) для описания изменения плотности древостоя $P(t)$ с возрастом лесонасаждения из физических соображений вывел Г.Ф.Хильми [1966]; оно также известно как уравнение Гомпертца. Показано [Хильми, 1966], что параметр $P_0(t)$ монотонно возрастает при переходе от лучших бонитетов к худшим. Для сосновых насаждений $\ln(P_{0N} - 206) = 0,490N + 3,57$, $R^2 = 0,98$. Коэффициент замещения $k = -\varepsilon / \sigma$ для одной породы постоянен, например, для сосновых насаждений $k = 0,019$ /год. Здесь σ – заряд, определяющий потребность насаждения в световой энергии, а именно количество энергии, что поглощает одновидовое, сомкнутое ($p=1$) насаждение на гектаре леса за весь жизненный цикл; ε – заряд, определяющий количество солнечной энергии, падающей за год на единицу площади леса (световой поток) в конкретной природной зоне; $\tau = \sigma / \varepsilon = -1 / k$ – характерное время, минимально необхо-

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

димое лесонасаждению для реализации жизненного потенциала в данной географической среде (для сосны $\tau=53$ года). По аналогии с запасом имеется возможность пересчитывать показатели изреживания древостоев разных условий N местоположения и полноты p по этапным лесам лучшего бонитета: $N=0$ – величину безопасности существования $x_{Np}(t)$ и густоту насаждения $P_N(t)$:

$$x_{Np}(t) = pB_N x_{00}(t), \ln[P_N(t)/P_{0N}] = pB_N \ln[P_{00}(t)/P_{00}], P_N(t) = P_{0N} [P_{00}(t)/P_{00}]^{pB_N}, B_N = \ln P_{0N} / \ln(P_{00}). \quad (13)$$

Моделирование самоизреживания демонстрирует необходимость замены переменных, чтобы на основе однотипных дифференциальных уравнений получать специальные формулы для описания реального поведения систем разной сложности. Этот подход – типичный для оценки безопасности как одного из направлений поведенческой географии, где она смыкается с теорией возможностей, безопасности и риска, имеющих иную понятийную и аксиоматическую основу.

Механизм взаимодействия запасов биомассы различных пород в лесонасаждении в ходе сукцессионного цикла описывается в относительных показателях $y(t) = \{y_i(t)\}$, $y_i(t) = x_i(t) - x_{0i}(t)$ и скоростях $y'_i(t)$ их изменений в виде однородного уравнения (7) при $f(y) = y'_i(t)$:

$$y'_i(t) = a_{1i}y_1(t) + a_{2i}y_2(t) + \dots + a_{ji}y_j(t) + \dots + a_{ni}y_n(t), a_{ji} = -q_{yj}/q_{vi}. \quad (14)$$

Выделяется 6 стадий (фаз, геоситуаций) цикла – денудация, пионерность (иммиграция), колонизация, межвидовая конкуренция, биоценотическая реакция, стабилизация (климакс), обусловленные механизмами формирования сукцессий: подготовка пионерными видами условий для возобновления и роста коренных пород (содействие), толерантность этих пород к недостатку тепла, освещения и других ресурсов и противодействие внедрению прежних и новых видов (ингибирование) [41].

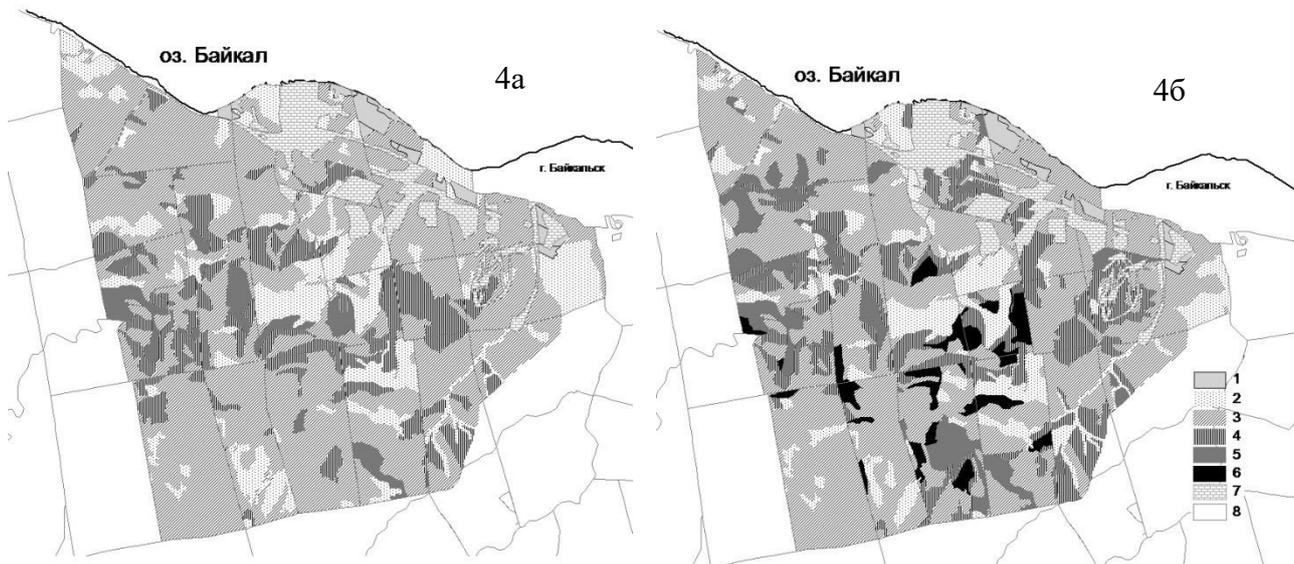


Рис. 4. Текущий запас главных лесобразующих пород (а) и их прогнозируемый запас через 50 лет (б): 1 – нет сведений; запас, м³/га: 2 – менее 50, 3 – 50–150, 4 – 150–250, 5 – 250–470, 6 – более 470; 7 – земли не лесного назначения; 8 – границы лесоаквационных кварталов

Данные лесоустройства Слюдянского лесхоза Иркутской области

Fig. 4. Current stock of main forest-forming species (a) and their predicted stock after 50 years (b): 1 – no information; reserve, m³/ha: 2 – less than 50, 3 – 50–150, 4 – 150–250, 5 – 250–470, 6 – more than 470; 7 – non-forest land; 8 – boundaries of forest areas

Forest management data of the Slyudyansky forestry of the Irkutsk region.

В силу однородности функций, удовлетворяющих уравнению (7), справедливо стандартное соотношение $x_{Np_i}(t) = p x_{Ni}(t) = p B_N x_{00i}(t)$ для запасов лесов каждой i породы или группы пород (мелколиственные, светлохвойные и темнохвойные), отражающих принцип подобия хода роста насаждений в разных условиях [18]. Сначала по данным ГИС лесоустройства

*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

по лесотаксационным выделам формируются эскизы таблиц хода роста эталонных нормальных ($p=1$) насаждений по группам пород i и группам типов леса: $x_{00i}(t)=x_{Npi}(t)/pB_N$ с учетом особенностей характеристик полноты p и бонитета B_N . По участкам выделов с помощью эталонных кривых производится временной сдвиг значения запаса $x_{00i}(t) \rightarrow x_{00i}(t+\Delta t)$, а затем они корректируются по ситуации $x_{Npi}(t+\Delta t) = pB_N x_{00i}(t+\Delta t)$. Таким образом на основе карт исходных таксационных значений запаса $x_{Npi}(t)$ строятся прогнозные карты $x_{Npi}(t+\Delta t)$ на $\Delta t=50$ лет вперед (рис.4). Такого рода функциональные модели $x_{Npi}(t)$ включают в себя образ прошлого, настоящего и будущего.

В общем случае в поведении системы что-то рефлекторно сохраняется, что-то изменяется под действием внутренних стимулов и окружающей среды. В основе механизма, определяющего такие реакции, лежат явления подавления или развития рефлекса цели, формализованные в потребностно-информационной модели П. В. Симонова [23], согласно которой реакция определяется тем же самым различием $y(t)=x(t)-x_0(t)$ представлений человека или общества о величине потребности $x_0(t)$ (желаемой цели) и возможности $x(t)$ ее удовлетворения. Соответственно формируется поведение в социальной и политической сферах, когда нужно отличать желаемое (возможное) от действительного.

Выводы

Поведенческая география, рассматриваемая в качестве раздела интертеории механизмов поведения прямого и обратного взаимодействий компонентов геосистем и с учетом особенностей географической среды их изменения в пространстве и во времени, позволяет считать эту интертеорию географической дисциплиной, изучающей с общих позиций поведение систем в природе, в обществе и на производстве. Интегральная геосистема поведения формируется в похожих по строению тотальном и локальных фазовых пространствах характеристик ее состояния и состояния ее частей как системная функция этих характеристик и их изменений в текущем времени и путевом пространстве. Различаются исходное фазовое пространство и расслоенное фазовое пространство, где каждый слой сопоставляется определенному типу поведения системы. Локальное пространство слоя определяется координатами, смещенными относительно характеристик географической среды. Траектории поведения систем задаются в виде фазовых кривых в этих пространствах. Объекты описываются в локальных пространствах, а затем модельное описание корректируется с учетом средовой определенности. Расчеты по модели проводятся как при постоянной, так и при изменчивой среде.

С метатеоретических позиций поведение в слое отражается производной Лагранжа и уравнением Эйлера. В поведенческой географии фазовым переменным и функциям этих соотношений придается специальный содержательный смысл, когда поведение сопоставляется с жизненным циклом геосистемы – направленным движением объекта изучения в пространстве и времени. Различаются два вида поведения: холистический, отражающий движение геосистемы в целом, и механический, учитывающий механизмы взаимодействия частей целого в схемах регулирования, что однозначно определяет предмет исследования интертеории поведения систем. Понятия и аксиомы интертеории выражают нормы и нормативы поведения и законы связи изменений с действием механизмов регулирования. Введение масштабных и иных множителей не изменяет истинности законов связи фазовых переменных, выражает их аффинную инвариантность (симметрию). Итоговое поведение определяется равнодействующей всех влияющих на геосистему сил, связанных с индивидуальными зарядами силы воздействия.

Самостоятельный поведенческий подход к сквозному моделированию действительности соотносится с другими методами системного моделирования, в частности, с описанием динамики систем, дополняющих друг друга. Тесная связь существует с методами теории деятельности, изучающей общественные системы отношений людей друг к другу и к дейст-

Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.

вительности и формирующиеся на этой основе организации и их изменения под влиянием социальных действий. Выделяются стационарные и нестационарные, устойчивые и неустойчивые, автономные и неавтономные системы поведения – последние связаны с воздействием изменчивой окружающей среды и внешним управлением.

Логика построения и анализа моделей поведения компонентов геосистем продемонстрирована на примере жизненного цикла древостоев в показателях роста, конкуренции и самоизреживания насаждений. Предложен алгоритм прогнозного моделирования и картографирования лесов с поправкой на полноту и бонитет насаждений, основанный на подобии временных зависимостей изменения запасов древесины леса. Геосистемы изучаются «в чистом виде» для эталонных лесов, а потом соотносятся со своей географической средой, регламентирующей поведение геосистемы.

Поведенческие системы как любые механические системы допускают использование большого количества математических методов анализа для решения задач индикации, прогнозирования и оптимального управления. Это открывает неограниченные возможности для исследования и моделирования интегральных геосистем как механизмов регулирования территориального взаимодействия их природных и общественных составляющих.

Список источников

1. Арманд А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука, 1988. 264 с.
2. Арманд Д.Л. Наука о ландшафте (основы теории и логико-математические методы). М.: Мысль, 1975. 288 с.
3. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1971. 240 с.
4. Бакланов П.Я. Геосистемный подход в географических исследованиях // Тихоокеанская география. 2020. №1. С. 7–12.
5. Беляев В.И. Теория сложных геосистем. Киев: Наукова думка, 1978. 156 с.
6. Беручашивили Н.Л. Четыре измерения ландшафта. М.: Мысль, 1986. 182 с.
7. Большой толковый психологический словарь = The Penguin dictionary of psychology: основные термины и понятия по психологии и психиатрии: в 2 т. / А. Ребер., ред. М.: Вече: АСТ, 2003. Т. 2. 559 с. [Электронный ресурс], URL: https://www.psyoffice.ru/slovar-s55-en_1-p21.htm (дата обращения: 15.06.2022).
8. Высоцкий Г.Н. У окна вагона. Наблюдения и размышления. // Тр. Бюро по прикл. Ботанике. 1917. т. X. № 2. С. 220–247; № 7-10, С. 631–656.
9. Голд Дж. Психология и география: основы поведенческой географии. М., 1990. 304 с.
10. Дьяконов К.Н. Влияние крупных равнинных водохранилищ на леса прибрежной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 127 с.
11. Дьяконов К.Н. Геофизика ландшафта. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:0133933> (дата обращения: 15.06.2022).
12. Замятина Н.Ю., Митин И.И. Поведенческая география // Большая российская энциклопедия. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://bigenc.ru/geography/text/3147409> (дата обращения: 15.06.2022).
13. Карпенко Ю. Опыты М.Эдмса и Р.Пеоша по психокинезу у животных. [Электронный ресурс], URL: <https://www.psychology-online.net/articles/doc-624.html> 2021(дата обращения: 15.06.2022).
14. Котляков В.М., Трофимов А.М., Селиверстов Ю.П., Солодуха Н.М. Моделирование экологических ситуаций // Изв. РАН. Сер. Геогр. 1995. № 1. С. 5–20.
15. Кульман А. Экономические механизмы. М.: Универс, 1993. 192 с.
16. Ляпунов А.А. О некоторых особенностях строения современного теоретического знания // Алексей Андреевич Ляпунов. 100 лет со дня рождения. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2011. С. 145–162.
17. Моисеев Н.Н. Экология человечества глазами математика: Человек, природа и будущее цивилизации. М.: URSS, 2022. 256 с.
18. Мясникова С.И., Черкашин А.К. Прогнозное геоинформационное моделирование и картографирование динамики запасов таежных лесов // Геодезия и картография. 2010. № 11. С. 30–33.
19. Природа России из окна поезда "Москва – Владивосток". [Электронный ресурс], URL: <https://www.youtube.com/watch?v=снусXUZT4WI> (дата обращения: 15.06.2022).
20. Рубцов В.А., Трофимов А.М. Казанская экономико-географическая школа «Математико-географического моделирования пространственных систем» // Ученые записки Казанского государственного университета. Кн. 4. Естественные науки. 2007. Т. 149. С. 204–214.
21. Северцов А.Н. Морфологические закономерности эволюции. М.; Л.: Изд-во АН, 1939. 610 с.
22. Сериков А.Е. Поведение человека и современные подходы к его пониманию // Вестник Самарской гуманитарной академии. Серия «Философия. Филология». 2013. № 2(14). С. 58–77.
23. Симонов П.В. Потребностно-информационная теория эмоций // Вопр. Психологии. 1982. № 6. С. 44–56.
24. Солнцев В.Н. Системная организация ландшафтов. М.: Мысль, 1981. 240 с.
25. Сочава В.Б. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 317 с.
26. Столбов В.А., Шарыгин М.Д. Поведенческая география. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2009. 354 с.

*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

27. Суханов В.В. Модель распределения видового обилия по литорали островной гряды // Морская биогеография: предмет, методы, принципы районирования. М.: Наука, 1982. С. 52–75.
28. Сысоев В.В. Введение в физико-математическую теорию геосистем. М.: Ленанд URSS, 2020. 600 с.
29. Трофимов А.М. Моделирование геосистем - концептуальный аспект: развитие основных идей и путей математизации и формализации географии. Казань: Экоцентр, 1997. 143 с.
30. Трофимов А.М., Рубцов В.А., Ермолаев О.П. Региональный геоэкологический анализ. Казань, 2009. 428 с.
31. Хильми Г.Ф. Основы физики биосферы. Л.: Наука, 1966. 300 с.
32. Черкашин А.К. Геосистемы и географическая среда // География и природные ресурсы. 2021. № 1. С. 5–15
33. Черкашин А.К. Особенности географического мета-анализа // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 2(57). С. 6–21.
34. Черкашин А.К. Полисистемный анализ и синтез. Приложение в географии. Новосибирск: Наука, 1997. 502 с.
35. Черкашин А.К. Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука, 2005. 280 с.
36. Черкашин А.К., Распутина Е.А. Комплексная география как направление теоретических исследований и моделирования // Географический вестник, 2022. №1 (60). С. 6–22. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-1-6-22>
37. Черкашин А.К., Солодянкина С.В. Функциональная география как направление теоретических исследований и моделирования // География и природные ресурсы. 2018. №2. С. 181–190.
38. Юдин Э.Г. Поведение // Новая философская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://gufo.me/dict/philosophy_encyclopedia/ (дата обращения: 15.06.2022).
39. Argent N.M., Walmsley D.J. From the Inside Looking Out and the Outside Looking In: Whatever Happened to 'Behavioural Geography'? // Geographical Research 47.2, 2009. p. 192–203.
40. 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.
41. Clements F. Plant succession: an analysis of the development of vegetation. Washington: Carnegie Institution of Washington, 1916. 512 p.
42. Gold J.R. Behavioural geography, International Encyclopedia of Human Geography, second edition, A. Kobayashi, ed., 2019, vol.1. Oxford: Elsevier. 21 P. [Электронный ресурс], URL: https://www.researchgate.net/publication/289042344_Behavioral_Geography (дата обращения: 15.06.2022).
43. Golledge R.G., Stimpson R.J. Spatial behaviour: a geographic perspective, New York: Guilford Press, 1997. 620 p.
44. Golledge R.G. Behavioral geography and the theoretical/quantitative revolution, Geographical Analysis, 2008. 40. p. 239–257.
45. Harrison E.R. Masks of the Universe: Changing ideas on the nature of the Cosmos. - Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 342 p.
46. Husain M. Models in Geography. New Delhi: Rawat Publications, 2007. 346 p.
47. Montello D.R., ed. Handbook of Behavioral and Cognitive Geography, Cheltenham, Northampton: Edward Elgar Publishing, 2018. 432 p.
48. Rougerie G., Beruchashvili N.L. Geosystems et paysages. Bilan et Methodes, Paris, Armand Colin, 1991. 302 p.
49. Sauer C.O. The morphology of landscape. California: University California Publ., Geography, 1925. № 2. p. 19–53. Reprinted in: Human geography. An essential anthology. UK. Oxford: Blackwell publishing, 1996. p. 296–315.

References

1. Armand, A.D. (1988), *Samoorganizaciya i samoregulirovanie geograficheskikh system* [Self-organization and self-regulation of geographical systems], Nauka, Moscow, Russia.
2. Armand, D.L. (1975), *Nauka o landshafte (osnovy teorii i logiko-matematicheskie metody)* [Landscape science (fundamentals of theory and logical and mathematical methods)], Mysl', Moscow, Russia.
3. Arnol'd, V.I. (1971), *Obyknovennye differentsial'nye uravneniya* [Ordinary differential equations], Nauka, Moscow, Russia.
4. Baklanov, P.Ya. (2020) "Geosystem approach in geographic studies" *Tihookeanskaya geografiya*, no. 1, pp. 7–12.
5. Belyaev, V.I. (1978), *Teoriya slozhnykh geosistem* [Theory of complex geosystems], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
6. Beruchashvili, N.L. (1986), *Chetyre izmereniya landshafta* [Four measurements of the landscape], Mysl', Moscow, Russia.
7. Reber, A. (ed.) (2003) *The Penguin dictionary of psychology*, Veche: AST, Moscow, Russia.
8. Vysockij, G.N. (1917), "At the window of the train. Observations and reflections", *Tr. Byuro po prikl. botanike*, X, no. 2, pp. 220–247; no. 7-10, pp. 631–656.
9. Gold, Dzh. (1990), *Psihologiya i geografiya: osnovy povedencheskoj geografii* [Psychology and geography: foundations of behavioral geography], Translated by Fedulov, S.V., Progress Publishing, Moscow, Russia.
10. D'yakonov, K.N. (1975), *Vliyanie krupnykh ravninykh vodohranilishch na lesa pribrezhnoj zony* [Impact of large lowland reservoirs on coastal forests], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.
11. D'yakonov, K.N. (2011), *Landscape geophysics*, [Online], available at: <http://www.lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:0133933> (Accessed 15 June 2022).
12. Zamyatina, N.Yu. and Mitin, I.I. (2016), *Behavioral geography*, [Online], available at: <https://bigenc.ru/geography/text/3147409> (Accessed 15 June 2022).
13. Karpenko, Yu. (2021), *Experiments by M. Emems and R. Peosh on psychokinesis in animals*, [Online], available at: <https://www.psychology-online.net/articles/doc-624.html> (Accessed 15 June 2022).
14. Kotlyakov, V.M., Trofimov, A.M., Seliverstov, Yu.P. and Soloduha, N.M. (1995), "Environmental Modeling", *Izv. RAN. Ser. Geogr.*, no. 1. pp. 5–20.
15. Kul'man, A. (1993), *Ekonomicheskie mekhanizmy* [Economic mechanisms], Univers, Moscow, Russia.
16. Lyapunov, A.A. (2011), "About some features of the structure of modern theoretical knowledge", *Aleksey Andreevich Lyapunov. 100 let so dnya rozhdeniya* [Alexey Andreevich Lyapunov. 100 years since birth]. Akad. izd-vo «Geo», Novosibirsk, Russia, pp. 145–162.

*Теория и методология географии
Лесных С.И., Черкашин А.К.*

17. Moiseev, N.N. (2022), *Ekologiya chelovechestva glazami matematika: Chelovek, priroda i budushchee civilizacii* [The ecology of mankind through the eyes of mathematics: Man, nature and the future of civilization], URSS, Moscow, Russia.
18. Myasnikova, S.I. and Cherkashin, A.K. (2010), "Forecast geo-information modeling and mapping of taiga forest reserves dynamics", *Geodesy and Cartography*, no. 11, pp. 30–33.
19. Nature of Russia from the window of the train "Moscow – Vladivostok" (2015), [Online], available at: <https://www.youtube.com/watch?v=cnycXUZT4WI> (Accessed 15 June 2022).
20. Rubcov, V.A. and Trofimov, A.M. (2007), "Kazan School of Economics and Geography "Mathematical and Geographical Modeling of Spatial Systems"", *Uchenye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta, Kn. 4, Estestvennye nauki*, vol. 149, pp. 204–214.
21. Severcov, A.N. (1939), *Morfologicheskie zakonomernosti evolyucii* [Morphological patterns of evolution], Izd-vo AN, Moscow – Leningrad, Russia.
22. Serikov, A.E. (2013), Human behavior and modern approaches to understanding it", *Vestnik Samarskoj gumanitarnoj akademii. Seriya «Filosofiya. Filologiya»*, no. 2(14), pp. 58–77.
23. Simonov, P.V. (1982), "Need-information theory of emotions", *Vopr. Psihologii*, no. 6, pp. 44–56.
24. Solncev, V.N. (1981), *Sistemnaya organizaciya landshaftov* [Landscape System Organization], *Mysl'*, Moscow, Russia.
25. Sochava, V.B. (1978), *Vvedenie v uchenie o geosistemah* [Introduction to the doctrine of geosystems], Nauka, Novosibirsk, Russia.
26. Stolbov, V.A. and Sharygin, M.D. (2009), *Povedencheskaya geografiya* [Behavioral geography], Permskij gos. un-t, Perm', Russia.
27. Suhanov, V.V. (1982), "Model of distribution of species abundance along the littoral of the island ridge", *Morskaya biogeografiya: predmet, metody, principy rajonirovaniya*, Nauka, Moscow, Russia, pp. 52–75.
28. Sysuev, V.V. (2020), *Vvedenie v fiziko-matematicheskuyu teoriyu geosistem* [Introduction to Physical and Mathematical Theory of Geosystems], Lenand URSS, Moscow, Russia.
29. Trofimov, A.M. (1997), *Modelirovanie geosistem - konceptual'nyj aspekt: razvitie osnovnyh idej i putej matematizacii i formalizacii geografii* [Geosystem modeling – conceptual aspect: development of the main ideas and ways of mathematization and formalization of geography], Ekocentr, Kazan', Russia.
30. Trofimov, A.M., Rubcov, V.A. and Ermolaev, O.P. (2009), *Regional'nyj geoekologicheskij analiz* [Regional geoeological analysis], Kazan', Russia.
31. Hil'mi, G.F. (1966), *Osnovy fiziki biosfery* [Fundamentals of biosphere physics], Nauka, Leningrad, Russia.
32. Cherkashin, A.K. (2021), "Geosystems and Geographical Environment", *Geography and natural resources*, no. 1, pp. 5–15.
33. Cherkashin, A.K. (2021), "Features of geographic meta-analysis", *Geographical bulletin*, no. 2(57), pp. 6–21.
34. Cherkashin, A.K. (1997), *Polisistemnyj analiz i sintez. Prilozhenie v geografii* [Polysystem analysis and synthesis. Application in geography], Nauka, Novosibirsk, Russia.
35. Cherkashin, A.K. (2005), *Polisistemnoe modelirovanie* [Polysystem modeling], Nauka, Novosibirsk, Russia.
36. Cherkashin A.K. and Rasputina E.A. (2022), "Complex geography as a direction of theoretical research and modeling", *Geographical bulletin*, no. 1 (60), pp. 6–22. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2022-1-6-22>
37. Cherkashin A.K. and Solodyankina S.V. (2018), "Functional geography as a direction of theoretical research and modeling", *Geography and natural resources*, no. 2, pp. 181–190.
38. Yudin, E.G. *Behavior*, *Novaya filosofskaya enciklopediya* [Online], available at: https://gufo.me/dict/philosophy_encyclopedia/ (Accessed 15 June 2022).
39. Argent, N.M and Walmsley, D.J. (2009), "From the Inside Looking Out and the Outside Looking In: Whatever Happened to 'Behavioural Geography'?", *Geographical Research*, 47.2, pp. 192–203.
40. Cherkashin, A.K. (2009), "Polysystem modelling of geographical processes and phenomena in nature and society", *Mathematical modelling of natural phenomena*, Vol. 4, no. 5, pp. 4–20.
41. Clements, F. (1916), *Plant succession: an analysis of the development of vegetation*, Carnegie Institution of Washington, Washington, USA.
42. Gold, J.R. (2009), "Behavioural geography", *International Encyclopedia of Human Geography*, second edition, A. Kobayashi (ed.), vol.1, Elsevier, Oxford. [Online], available at: https://www.researchgate.net/publication/289042344_Behavioral_Geography (Accessed 15 June 2022).
43. Golledge, R.G. and Stimpson, R.J. (1997), *Spatial behaviour: a geographic perspective*, Guilford Press, New York, USA.
44. Golledge, R.G. (2008), "Behavioral geography and the theoretical/quantitative revolution", *Geographical Analysis*, 40, pp. 239–257.
45. Harrison, E.R. (2003), *Masks of the Universe: Changing ideas on the nature of the Cosmos*, Cambridge University Press, Cambridge, GB.
46. Husain, M. (2007), *Models in Geography*, Rawat Publications, New Delhi, India.
47. Montello, D.R., (ed.) (2018), *Handbook of Behavioral and Cognitive Geography*, Cheltenham, Edward Elgar Publishing, Northampton, GB.
48. Rougerie, G. and Beruchashvili, N.L. (1991), *Geosystems et paysages. Bilan et Methodes*, Armand Colin, Paris, France.
49. Sauer, C.O. (1925), "The morphology of landscape", *Geography*, no. 2, pp. 19–53. (Reprinted in: Human geography. An essential anthology. UK. Oxford: Blackwell publishing, 1996. p. 296–315).

Статья поступила в редакцию: 24.05.2023, одобрена после рецензирования: 03.07.2023, принята к опубликованию: 12.12.2023.

The article was submitted: 24 May 2023; approved after review: 3 July 2023; accepted for publication: 12 December 2023.

*Теория и методология географии**Лесных С.И., Черкашин А.К.*

Информация об авторах

Светлана Ивановна Лесных

кандидат географических наук, старший научный сотрудник
лаборатории теоретической географии,
Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН;
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

e-mail: tyara@irigs.irk.ru

Information about the authors

Svetlana I. Lesnykh

Candidate of Geographical Sciences, Senior Researcher,
Laboratory of Theoretical Geography, V.B. Sochava Institute of
Geography SB RAS;
11, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033, Russia

Александр Константинович Черкашин

доктор географических наук, профессор, заведующий
лаборатории теоретической географии,
Институт географии им. В.Б.Сочавы СО РАН;
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

e-mail: akcherk@irnok.net

Alexander K. Cherkashin

Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the
Laboratory of Theoretical Geography, V.B. Sochava Institute of
Geography SB RAS;
1, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033, Russia

Вклад авторов

Лесных С.И. – сбор и обработка статистических данных, геоинформационное картографирование, написание текста статьи.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

Svetlana I. Lesnykh – material collection and processing; writing the article.

Alexander K. Cherkashin – the idea; writing the article; scientific editing of the text.

The authors declare no conflict of interest.