

ДИСКУССИИ

УДК 911.52

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(181-190)

А. К. ЧЕРКАШИН, С. В. СОЛОДЯНКИНА

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия,
cherk@mail.icc.ru, solodyankinasv@mail.ru

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ КАК НАПРАВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривается функциональная география как часть теории функциональных систем, предметом изучения которой становятся причинно-следственные связи влияния факторов и условий на процессы и явления различной природы. В рамках этого научно-географического направления основное внимание уделяется изучению условий среды, способам их учета в расчетных формулах, анализу критических уровней изменчивости и поиску средовых инвариантов. Через учет особенностей окружающей среды география обеспечивает информационную основу решения прикладных задач в других областях знания, доказывает средовую относительность и географический детерминизм проявления законов функционирования природы и общества. Обсуждаются вопросы соотношения структуры, динамики и функционирования в географических исследованиях, приведены теоретические и математические основы моделирования функциональных особенностей геосистем, обосновываются функциональный подход и соответствующие ему модели. Исследуются и моделируются функции геосистем в форме взаимодействия их компонентов, характеристики которых рассматриваются как факторы, совместно влияющие на степень проявления этих функций. Показано, что возможность объяснения закономерностей функционирования географических систем обеспечивается применением логарифмической шкалы характеристик влияющих факторов.

Ключевые слова: функциональные системы, функции геосистем, факторы и условия среды, математические модели причинно-следственных связей, логарифмические шкалы.

A. K. CHERKASHIN, S. V. SOLODYANKINA

V. B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Irkutsk, 664033, Russia, cherk@mail.icc.ru, solodyankinasv@mail.ru

FUNCTIONAL GEOGRAPHY AS A DIRECTION OF THEORETICAL RESEARCH AND MODELING

We examine functional geography as a part of the theory of functional systems, the subject matter of which now involves the cause-effect relationships of the influence of the factors and conditions on processes and phenomena of a different origin. Within the framework of this scientific and geographical direction, most attention is concentrated on the study into the environmental conditions, the methods of taking them into account in calculation formulas, analysis of critical levels of variability, and on the search for environmental invariants. By taking into consideration the distinguishing features of the environment, geography provides an informational basis for solving applied problems in other fields of knowledge, proves the environmental relativity and geographical determinism of the manifestation of the laws of the functioning of nature and society. The article discusses the relationship between structure, dynamics and functioning in geographical studies, presents the theoretical and mathematical bases for modelling the functional features of geosystems and substantiates the functional approach and the corresponding models. The functions of geosystems are investigated and modelled in the form of the interaction of their components, the characteristics of which are regarded as the factors that jointly influence the degree of manifestation of these functions. It is shown that the possibility of explaining the regularities of the functioning of geographical systems is ensured are provided by the use of the logarithmic scale of the characteristics of the influencing factors.

Keywords: functional systems, geosystem functions, environmental factors and conditions, mathematical models of cause-effect relationships, logarithmic scales.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач учения о геосистемах необходима не одна модель, а комплекс моделей с различающимися целевыми установками для формирования полной картины строения и функциональных особенностей геосистем [1]. В географических исследованиях разной направленности применяются разнообразные модели и методы, настолько отличающиеся по используемой терминологии друг от друга, что имеет смысл утверждать о существовании множества географических теорий, необходимых для многоаспектного, всестороннего отражения сложной территориальной действительности [2, 3]. Соответствующие теоретические подходы имеют аналоги в других смежных научных дисциплинах, что придает им сквозной характер и дает возможность разрабатывать сквозные теории (интертеории по А. А. Ляпунову [4]), позволяющие на единых началах описывать природные, хозяйственные и общественные образования. Необходимо выделить особенности каждой из таких теорий, их понятийный и аксиоматический базисы, продемонстрировать примеры их применения в практике географических исследований. В этой статье рассматривается концепция функциональной географии, определяется ее предмет, основные методы и модели, отражается отличие этого подхода от других направлений разработки теории географической науки, определяются количественные значения функций геосистем по материалам натурных экспериментальных исследований, выделяются основные факторы влияния на величину этих функций.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Термин «функциональная география» в зарубежной литературе давно и широко используется в науке и образовании [5]. Локальный анализ исследует функциональное значение места, ареальный — изучает причины изменения функций от места к месту в зависимости от состояния окружающей среды. Задачи регионального анализа в данном направлении — функциональное зонирование и районирование на основе разнообразных внутренних связей. Результат анализа — выделение функциональных регионов, формирующихся под влиянием функции центрального места или достижения определенных целей. Используется термин «функциональная структура» для отображения разнообразия функций экологических сообществ и экономических систем.

В географии исследуются функции геосистем и их реализация через разнообразные процессы функционирования. Причем геосистема здесь понимается в обобщенном смысле как интегральная геосистема, т. е. включающая природные, хозяйственные и социальные территориальные образования, их компонентные и парцеллярные составляющие — экосистемы, техносистемы и т. д. В этом случае функциональный подход и соответствующие ему модели приобретают сквозной интертеоретический характер.

Особо выделяются модели геосистем функционального типа, описывающие взаимодействие компонентов внутри геосистем, участков геоморфов между собой и в целом связи геосистемы с окружающей средой [1]. Обычно под функционированием понимается круговорот — поступление, транспорт, трансформация и выход из геосистемы всех видов вещества и энергии, по которым можно судить об особенностях этого взаимодействия [1, 6, 7]. Физико-географические исследования в этой области основаны на методах изучения вещественно-энергетического баланса. Г. Рихтер в 1968 г. [1] определил составляющие этого баланса, формирующие функциональную систему. Вместе с тем В. Б. Соचाва [1] выделил особый класс моделей межкомпонентного взаимодействия, не основанный на круговороте субстанции, а описывающий только связи между компонентами, характеристики которых рассматриваются в качестве факторов влияния на величину разных функций геоморфов, например, сноса и аккумуляции мелкого материала, формирования стока, накопления биомассы и гумуса.

Функциональный подход формируется как самостоятельное направление методологии научных исследований, дает возможность связать различные отрасли науки, способствует усилению целостности системы научного знания. По мнению Ю. Г. Маркова [8], это позволяет осуществить на практике идею В. И. Вернадского [9] о том, что «характерной чертой научной работы нашего времени является то, что она определяется не логическими рамками наук, а логическими рамками проблем» (с. 21), и это крайне важно сегодня для обеспечения единства всей науки [10], в том числе для формирования интертеоретического знания.

В формально-математическом выражении функция (функциональная зависимость) — это отображение $F: x \rightarrow y$, устанавливающее связь $y = F(x)$ между переменными величинами x и y или наборами величин $x = \{x_i\}$ и $y = \{y_j\}$. В последнем случае функция F определяется множеством функций $F = \{F_i\}$ —

вектор-функцией (полифункцией), когда переменная $y_i = F_i(x)$, т. е. одинаковые воздействия x приводят к разным результатам и их оценкам. Изменение независимых величин $\Delta x = \{\Delta x_j\}$ влечет за собой изменение функций $\Delta F(x) = F(x + \Delta x) - F(x)$, которое при $\Delta x \rightarrow dx \rightarrow 0$ описывается формулой полного дифференциала:

$$dF(x) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial F}{\partial x_j} dx_j, a_j = \frac{\partial F}{\partial x_j}, \quad (1)$$

где a_j — частная производная, или чувствительность функции $F(x)$ к изменению величины x_j . Согласно (1), и в философском, и в математическом смыслах, функция — это явление, зависящее от изменения других явлений [11]. Изменения dx_j отражают варьирование внешних факторов системы, а a_j — ее внутренних свойств относительно изменений внешних факторов.

Функциональный анализ изучает, в частности, бесконечномерные пространства функций, в которых координатам соответствуют независимые функции $F = \{F_i\}$, а произвольные представляют собой

взвешенную сумму этих координат: $S(x) = \sum_{i=1}^n c_i F_i(x)$, где c_i — весовое значение (координата) функции

F_i в формировании функции $S(x)$. В качестве F_i могут рассматриваться собственные функции решения дифференциальных уравнений, компоненты векторов, функции разложения в тригонометрические ряды Фурье или степенные ряды Тейлора, широко использующиеся в научных исследованиях. В частном случае, $F_i(x)$ соответствуют свойственным функциям разных типов геосистем (геомеров), а c_i рассчитывается как доля площади геосистем этого типа функционирования в ландшафте. Тогда $S(x)$ имеет смысл комплексной ландшафтной функции по данному базисному набору функций разных типов i геосистем $F = \{F_i\}$ с функциональной структурой $c = \{c_i\}$. На разных территориях этот набор функций сохраняется, а изменяется лишь площадное соотношение геомеров $c = \{c_i\}$. Необходимо исходить из понимания, что всякая функция реальной системы описывается определенной математической функцией, что существуют разнообразные интерпретации функций и что полученные разными способами результаты должны быть эквивалентными, и необходимо искать наиболее простой способ объяснения функциональной зависимости.

Функционалом J называется отношение, ставящее в соответствие каждой функции F значение величины z , т. е. $J: F \rightarrow z$, в частности, при расчете значения разных функций в фиксированной точке $x = x_0$, например, в состоянии равновесия системы со средой. Оператор L сопоставляет одну функцию с другой, например оператор дифференцирования (1) $L = d/dx: F(x) \rightarrow f(x) = LF(x) = dF/dx$. Сравнение функций и их изменения через отображения $F_{ij}: F_i(x) \rightarrow F_j(x)$ приводит к представлению о функциональном подобии, лежащему в основе комплексирования разных систем, создания теории комплексов [12]. Особый интерес представляет анализ функционального подобия при смещении функций по гомотопическому параметру, отражающему различие характеристик объектов и их географической среды [13, 14]. С одной стороны, это позволяет проводить сравнительно-географический анализ функций связи, а с другой — приводить функции к некоторому инвариантному виду, независимому от местной среды. Выделяются природно-территориальные и территориально-производственные функциональные комплексы, а также комплекс (интегративный синтез) функциональных систем живых организмов, рассматриваемый в рамках теории функциональных систем П. К. Анохина. В соответствии с ней организм человека — это совокупность множества взаимодействующих функциональных систем, каждая из которых способствует достижению устойчивости его существования [15].

Важный вопрос — о соотношении структуры, динамики и функционирования в географических исследованиях [16, 17]. Динамическая структура — это распределение $N(t) = \{N_i(t)\}$ в разные моменты времени t элементов системы по состояниям i , например, деревьев в древостое по возрасту или толщине, площади ландшафта по восстановительно-возрастным, сукцессионным стадиям растительного покрова. Структура изменяется в результате перехода (потока) элементов из состояния i в состояние j : $I_{ij} = p_{ij} F_i(x, t) N_i(t) / \Delta Q_i = p_{ij} N_i(t) / \Delta \tau_i$.

Изменение $N_i(t)$ определяется балансом притоков и оттоков элементов из i -го состояния по разным направлениям j с вероятностью p_{ij} . Функция $F_i(x, t)$ отображает интенсивность функционирования, например, среднюю скорость роста по диаметру или в высоту Q_i в группе деревьев N_i на интервале значений ΔQ_i ; $F_i(x, t)$ зависит от особенностей факторов и условий x местоположения. Величина p_{ij} соответствует вероятности перехода из состояния i в j , а $p_{0ij} = 1 - p_{ij}$ имеет смысл вероятности перехода в другие состояния, в частности, выхода элементов из динамического процесса, например,

в результате гибели. Среднее время $\Delta\tau_i = \Delta Q_i / F_i(x, t)$ существования элемента в i -м состоянии определяется интенсивностью функционирования $F_i(x, t)$ и интервалом ΔQ_i , который необходимо пройти каждому элементу со скоростью $F_i(x, t)$, чтобы выйти из i -го состояния [2].

По данной причине функционирование — элементарный уровень динамики геосистем, проявляющийся в изменениях отдельных элементов. Как отмечал А. Г. Исаченко [18], функционирование ландшафта складывается из множества элементарных процессов-изменений, имеющих физико-механическую, химическую или биологическую природу, т. е. все географические динамические процессы могут быть сведены к подобным элементарным составляющим динамики. Это означает существование иерархии, вложенности динамических процессов, которые на элементарном уровне считаются функционированием, но могут рассматриваться как динамический процесс со своими элементарными изменениями. С другой стороны, знание закономерностей функционирования F_i как зависимости изменений от факторов географической среды позволяет рассчитывать интенсивность динамических явлений с учетом особенностей местоположения.

Уравнения потоковых динамических процессов отображают в единстве пространственную N_i , временную $\Delta\tau_i$, функциональную F_i и сетевую p_{ij} структуры в геосистемах. Каждая из этих структур исследуется с помощью отдельных методов и моделей, например, для анализа вероятности ветвления процессов по разным направлениям используются ориентированные графы (сети) и понятия теории надежности.

Функция изменения элементов F как целостных образований без учета их внутренней структуры в географии трактуется в качестве функции места, которая определяется ролью и значением объектов и их местоположением в сложившейся территориальной системе применительно к оцениваемым процессам и явлениям, например, функции городов в системе расселения и хозяйствования. Выделяются функциональные типы поселений: сельскохозяйственные, промышленные и т. д. С этим связаны идеи функционального зонирования — разделение территории на зоны разного функционального назначения с определением допустимых видов деятельности, направлений и режимов использования местных ресурсов, решения задач охраны природы и здоровья населения. Определение функциональных зон похоже на выделение пространственных ниш в экологии, т. е. мест, занимаемых видами в сообществе с учетом их биоценологических связей и требований к факторам среды. По Ю. Одуму [19], экологическая ниша включает не только физическое пространство, занимаемое организмом, но и функциональную роль организма в сообществе и его положение относительно градиентов внешних факторов. В экосистемах функционирование популяции и сообщества в основном оценивается по скорости производства первичной продукции и ее преобразования в биогеохимических циклах [20]. Зависимости этих скоростей от климатических характеристик представлены кривыми толерантности — моделями экологических ниш в виде схем гидротермических ареалов и климограмм или колоколообразных кривых и функций частоты распределения параметров экосистем по градиентам факторов. По сходным принципам строится известная периодическая система природных зон Григорьева–Будыко [21].

Р. де Грут [22] развивал представления о функциях природы для решения задач планирования и управления окружающей средой. Им и его соавторами предложена концепция экосистемных услуг, связывающая их с благосостоянием человечества [23]. Она принята международным научным сообществом и представлена многочисленными направлениями исследований, включая решение задач выделения функций и проведения оценки, формирования рынков экологических услуг, выявление потенциальных продавцов и покупателей [24]. В данной концепции ставятся проблемы разработки механизмов сохранения и оптимизации функций природных систем, создания технологий, замещающих эти функции. Экосистемные функции и услуги следует понимать расширенно, включая в них абиотические составляющие, как геосистемные функции и услуги, особенности которых зависят от местоположения [25]. Геосистемные функции определяют функциональную роль и показатели интенсивности процессов функционирования геосистем конкретного вида и иерархического уровня на территории. Геосистемные функции отражают закономерности воздействия факторов среды на геосистемы и их компоненты. По свойственным функциональным зависимостям рассчитываются значения производительности геосистем [26] или на основе знания функциональных свойств биологических видов решаются задачи их распространения [27].

По этой причине актуальной задачей географических исследований остается оценка влияния местных, региональных и глобальных факторов и условий на природные и социально-экономические процессы, в частности, на здоровье населения [28]. Это воздействие оценивается по изменению различных индикаторов — параметров разных компонентов географических систем. Такое направление научной работы соответствует задачам факториальной экологии [29, 30], факторальной географии [7],

факторной экономики [31], выделяющих корреляции разнокачественных событий, их причинно-следственные отношения. В связи с этим развиваются подходы функциональной экологии, экономики и географии, предмет изучения которых — геосистемные функции реализации отношений типа «воздействие—реакция», «доза—эффект», «фактор—результат» в природе и обществе. Исследованием соответствующих закономерностей занимается раздел науки, который можно назвать функциональной географией. Ее предмет объединяет задачи ординации и классификации геосистем, формирования факторальных рядов, факторный и градиентный анализ, расчет ресурсной ренты, природного и экологического риска, интегральных показателей условий жизнедеятельности, функционального зонирования и др. Это направление сквозным образом проходит через отраслевые географические науки, одновременно относится к ее природным, экономическим и социальным направлениям исследований [14].

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Функции реакции (отклика) на факторное влияние в философской трактовке соответствуют связи причины и следствия. Известны разные попытки математически выразить причинно-следственные отношения [32]. Исследуем эту проблему с двух сторон: теоретического и метатеоретического (МТ) подхода.

Вид формулы связи подсказывает уравнение (1), если предположить (в рамках МТ-подхода), что оно действует не только для бесконечно малых приращений dx_j и dF , но и на конечных приращениях $f = \Delta F = F - F_0$ и $y_j = \Delta x_j = x_j - x_{0j}$, где x_j соответствует причине (фактору) действия, а x_{0j} — условиям среды реализации функции $F(x)$:

$$f(y) = F(x) - F(x_0) = \sum_{j=1}^n a_j (x_j - x_{0j}), \quad a_j = \frac{\partial f(y)}{\partial y_j} = \frac{\partial F(x)}{\partial x_j}. \quad (2)$$

Если математическое соотношение (1) справедливо для всех аналитических функций, то (2) выделяет из них только однородные первого порядка со свойством зависимости от масштаба s геосистемы: $f(sy) = sf(y)$. Переменные a_j в этом случае представляют собой однородные функции нулевого порядка, т. е. их действие не зависит от масштаба величин: $a_j(sy) = a_j(y)$.

Величины x_{0j} отображают своеобразие географических условий и типовых свойств геосистем, в которых реализуется влияние факторов x_j . Величина $F_0 = F(x_0)$ при $a_j = 0$ соответствует экстремальному значению функции $F(x)$, которое достигается и при $x_j = x_{0j}$, когда величина факторов x_j соответствует условиям x_{0j} их воздействия. Последнее равенство в (2) требует постоянства условий x_{0j} действия соответствующих факторов. Это требование можно связать с законом квантитативной компенсации в функциях биосферы А. Л. Чижевского [33], согласно которому, подобно устойчивому колебанию потока солнечной энергии, колебания $y = \Delta x$ в процессах живой и неживой природы должны происходить в пределах некоторой нормативной величины y_0 . Положительные и отрицательные отклонения $y = x - x_0$ в среднем должны компенсироваться, давая близкую к постоянной величину $x = x_0$ (средообусловленную норму).

Исследовательские модели и методы функциональной географии основываются на теории функциональных систем [2, 3], которая описывает возникновение причинно-следственного влияния факторов x_j на реакцию системы $F(x)$ опосредованно через воздействие a_j этих факторов x_j и связанных с ними условий среды x_{0j} . В разных условиях a_j и x_{0j} одна и та же причина имеет различные следствия. Все функциональные переменные задаются в логарифмическом масштабе $x_j = \ln z_j$, $F(x) = \ln P(z)$, что позволяет перевести их в безразмерные величины и сравнивать между собой. В логарифмических переменных МТ-уравнение (2) будет выглядеть так:

$$f(y) = \ln P(z) - \ln P(z_0) = \sum_{j=1}^n a_j (\ln z_j - \ln z_{0j}), \quad y_j = \ln z_j - \ln z_{0j}. \quad (3)$$

Согласно (2), переменная a_j , которая в данном случае имеет смысл коэффициента эластичности (КЭ) относительного изменения $P_i(z)$ (в %) при изменении z_j на 1 %, должна быть однородной функцией нулевого порядка, например, в форме экспоненциальной зависимости $a_j(y) = c_j \exp(ky_j/y_l)$. Отметим, что в функциональной модели (3) размерность величин z_j не влияет на значение эластичности.

Выделим фактор непосредственного влияния y_j и остальные, сопутствующие факторы y_0 , которые в совокупности назовем кофактором. В этом случае полученная ранее полуэмпирическая формула

для зависимости распределения площади геомов по высоте $f(y)$ [14] будет иметь следующий вид (k — константа):

$$f(y) = c_j \left[(y_j + y_0) \exp(ky_j/y_0) - y_0 \right]. \quad (4)$$

Это уравнение удовлетворяет соотношению (2) для двух переменных: $y_j = x_j - x_{0j} = \ln z_j - \ln z_{0j}$ и $y_0 = x - x_0 = \ln z - \ln z_0$. Выражение (4) эмпирически подтверждает требование однородности первого порядка функций решения уравнения (2) и нулевой однородности показателей чувствительности:

$$\begin{aligned} \text{а) } \frac{\partial f}{\partial y_j} &= c_j \exp(ky_j/y_0) (1 + ky_j/y_0 + k); \\ \text{б) } \frac{\partial f}{\partial y_0} &= -c_j \exp(ky_j/y_0) \left[ky_j^2/y_0^2 + ky_j/y_0 - 1 \right] + c_j. \end{aligned} \quad (5)$$

Интересен факт, что в общем изменчивая величина кофактора y_0 в (4), в частном случае отражающая региональную среду воздействия высотного градиента на геосистемы разного типа и являющаяся своеобразной единицей измерения влияния (y_j/y_0), постоянна [14]. Поскольку y_0 выражает степень отклонения $y_0 = x - x_0 = \ln z - \ln z_0$ факторов региональной среды z от нормы z_0 , постоянство y_0 можно считать еще одним доказательством справедливости закона А. Л. Чижевского о компенсации функций биосферы.

Коэффициент k представляет собой своеобразный показатель сложности, нелинейности причинно-следственных связей. В простейшем случае при $k = 0$ уравнение (4) приводится к виду $f(y) = c_j y_j$, где $a_j = c_j$ — постоянная величина. В этом варианте выделить по данным глобальный норматив отклонения y_0 не представляется возможным, поэтому анализируются локальные закономерности связи функций, факторов и условий в виде линейного (в логарифмической шкале) уравнения

$$f(y) = \ln P(z) - \ln P(z_0) = \sum_{j=1}^n c_j (\ln z_j - \ln z_{0j}), \quad (6)$$

приводящегося к множественной аллометрической зависимости

$$P(z) = P(z_0) \prod_{j=1}^n (z_j/z_{0j})^{c_j}, \quad (7)$$

которую связывают с законом минимума Ю. Либиха [34]. Согласно этому закону, проявление функции $P_i(z)$ ограничивается нехваткой единственного фактора z_j , количество которого ниже необходимого минимума — порогового значения z_{0j} . Действительно, согласно уравнению (7), при $c_j > 1$ и $z_j = 0$ будет $P(z) = 0$. Соотношение (7), как следует из (3), справедливо и для переменных значений $c_j = a_j(y)$, только зависимости $P(z)$ будут намного сложнее. По известному закону толерантности В. Шелфорда, лимитирующим фактором может быть как недостаток ($a_j > 0$), так и избыток ($a_j < 0$) воздействия (рис. 1). Экстремальная реакция на факторное влияние достигается при $a_j = 0$ и равна $P(z) = P(z_0)$. В том случае, когда действие лимитирующего фактора не равно точно нулю $(z_j/z_{0j})^{a_j} \neq 0$, влияние других факторов также прослеживается. Факторы z , отклоняющие реакцию от оптимума $P(z_0)$, имеют особое значение для биологических видов и природных фаций, определяя их географический ареал.

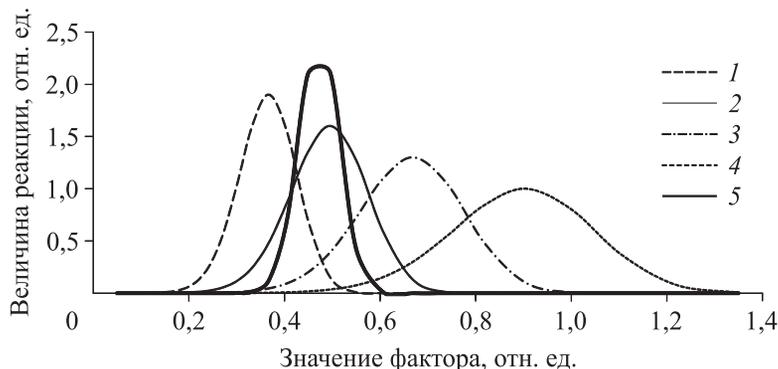


Рис. 1. Модельные кривые толерантности разных геосистем к факторному воздействию z (по уравнению (4)).

Геосистемы различаются по модальным значениям z_0 , соответствующим максимальной величине функций $P(z_0)$, выраженных в относительных единицах ($z_0; P(z_0)$): 1 — (0,37; 1,9), 2 — (0,5; 1,6), 3 — (0,67; 1,3), 4 — (0,9; 1,0), 5 — (0,5; 2,1), сочетанное влияние факторов.

Предварительный анализ функциональных связей начинается с расчета коэффициентов регрессии уравнения (3) a_j и $b(z_0)$ в разных ситуациях. Затем на основе зависимости

$$b(z_0) = \ln P(z_0) - \sum_{j=1}^n a_j \ln z_{0j} \tag{8}$$

рассчитываются значения $\ln P(z_0)$, $\ln z_{0j}$. Полученные соотношения можно обобщить на нелинейные функции вида (4), задав ненулевые значения соотношения k/y_0 .

ОБЪЕКТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментально изучалась зависимость интенсивности водной эрозии от природных и антропогенных факторов в августе 2015 г. на юго-восточном побережье залива Мухор оз. Байкал на склонах степных и лесостепных комплексов. На 23 тестовых площадках выполнено 28 замеров переноса терригенных материалов и почвы под влиянием осадков. Ливневый дождь и его последствия имитировались с помощью установки, равномерно разбрызгивающей воду и улавливающей переносимый поверхностным стоком мелкозем [35, 36]. Из факторов учитывались: наклон местности (градус, z_1), доля мелкого песка в верхнем горизонте почвы (% , z_2), фитомасса наземного покрова (воздушно-сухой вес, $г/м^2$, z_3), степень антропогенной деградации напочвенного покрова (баллы от 1 до 5, z_4).

Функциональная зависимость интенсивности сноса материала $P(z)$ ($г/м^2$) от перечисленных факторов проявляется со значением коэффициента множественной корреляции $R = 0,84$ и соответствует регрессионному уравнению вида (6) в логарифмических переменных $f(x) = \ln P(z)$, $x_j = \ln z_j$:

$$f(x) = 1,25x_1 + 0,37x_2 - 0,22x_3 + 1,68x_4 - 7,93. \tag{9}$$

Значение $b(x_0) = -7,93$ согласно (8), находится при соответствии значений факторов условиям $x_j = x_{0j}$, т. е. представляет собой комплексный индикатор условий реализации зависимости. Значения КЭ c_j по трем факторам положительны, по показателю фитомассы отрицательны, т. е. обилие растительности снижает снос почвенного материала и при больших значениях выполняет роль лимитирующего фактора. Наибольшая чувствительность процесса наблюдается к фактору антропогенной деградации (КЭ = 1,68). Результат совместного действия факторов определяется «весом» каждого фактора, исчисляемым показателем КЭ.

Характеристики факторных условий $x_{0j} = \ln z_{0j}$ находятся по описанной методике с использованием уравнения (8). Для этого выделили пять пространственно близких участков с 5–6 замерами показателей переноса почвенного материала в разных фациях и их антропогенных модификаций. В таблице представлены значения КЭ a_j по разным участкам и параметры условий $x_{0j} = \ln z_{0j}$ по факторам z_j . На значения x_{0j} помимо среды влияет также размерность исходных переменных z_j . Исключить размерность и сопоставлять шкалы для z_j позволяет расчет смещенных переменных $y_j = x_j - x_{0j} = \ln z_j - \ln z_{0j}$. Величины $x_{0j} = \ln z_{0j}$ постоянны и отражают факторное воздействие, относящееся к «прочим равным условиям» многообразия рассматриваемых ситуаций пофакторной реализации причинно-следственных связей.

КЭ по участкам изменяются в основном согласованно: значения КЭ по биомассе и антропогенной деградации колеблются в противофазе изменениям физических характеристик КЭ для наклона и механического состава. Отношение

$$E_{ij} = -\frac{a_i}{a_j} = -\frac{\partial F}{\partial x_i} / \frac{\partial F}{\partial x_j} = \frac{\partial x_j}{\partial x_i} = \frac{\partial z_j}{z_j} / \frac{\partial z_i}{z_i} \tag{10}$$

имеет смысл эластичности замещения факторов (ЭЗФ), показывающей, на сколько процентов необходимо изменить влияние фактора z_j при изменении влияния другого фактора z_i на 1 %, чтобы

Значения показателей пофакторной эластичности для участков ландшафтов Приольхонья по результатам исследований 2015 г.

Участок	Параметр регрессии B	Коэффициент эластичности				Эластичность замещения по наклону		
		a_1	a_2	a_3	a_4	E_{12}	E_{13}	E_{14}
1	-25,26	2,40	0,86	0,24	12,04	-2,80	-9,84	-0,20
2	8,28	1,49	-3,47	-0,01	2,62	0,43	107,62	-0,57
3	-23,10	0,40	-1,30	0,87	20,70	0,31	-0,46	-0,02
4	-14,71	7,89	1,01	-0,60	-3,66	-7,82	13,06	2,15
5	-11,38	2,40	1,93	-1,74	4,08	-1,24	1,38	-0,59

величина реакции F оставалась постоянной. Например, на участке 1 лесостепи увеличение на 1 % наклона поверхности допускает 10 % сокращение фитомассы наземного покрова без изменения объемов сноса, а такое же изменение формы склона в каменистой степи (участок 4) требует увеличения запасов растительности на 13 % для сохранения прежней величины сноса почвенного материала. По данному критерию сохранения почвенного покрова наиболее устойчивой к изменению антропогенной нагрузки ($E_{43} = -a_4/a_3 = -49,4$) можно считать растительность участка 1, наименее устойчивой — участка 2 на границе лиственного леса ($E_{43} = 190$). Средние показатели ЭЗФ, отражающие основные связи, рассчитываются по коэффициентам уравнения (9).

Кофактор $y_0 = 12,6$ является общим для всех учитываемых в формулах факторов, значение которых задается в логарифмическом масштабе $y_j = x_j - x_{0j} = \ln z_j - \ln z_{0j}$. Значения рассчитанных характеристик условий среды следующие: $f_0 = -4,79$; $x_{01} = 1,50$; $x_{02} = 5,08$; $x_{03} = 6,08$; $x_{04} = 0,92$. Согласно (3), нелинейное уравнение реакции на факторное воздействие записывается по аналогии с уравнением (4):

$$f(y) = \sum_{j=1}^4 c_j [(y_j + y_0) \exp(ky_j/y_0) - y_0] + c_0. \quad (11)$$

При $k = 1$ значение кофактора y_0 и поправочного коэффициента c_0 подбирается так, чтобы сохранялись КЭ c_j в линейном выражении (9) ($y_0 = 12,6$; $c_0 = 1,56$ при $R = 0,81$).

Согласно (11), зависимость $f(y)$ от переменных y_j на рассматриваемом интервале их значений нелинейна. Рассчитанная по (5) взаимосвязь КЭ a_j разных факторов почти линейна, что подтверждается результатами обработки данных наблюдений (см. таблицу), особенно для ненарушенных геосистем. Значения a_j с ростом фактора увеличиваются, за исключением фитомассы, величина которой отрицательно воздействует на чувствительность a_j . Показатель ЭЗФ по изменению наклона участков территории отрицательный для содержания песка в почве и повышается с ростом величины фактора, для биомассы — положительный и снижается, для антропогенного воздействия — отрицательный и держится на уровне примерно 0,67 %.

Приведенные уравнения в упрощенном варианте используются в разных областях науки. В биологии распространены степенные соотношения (7) для одной переменной, известные как аллометрические уравнения [37].

Анализ факторного влияния в географии связан с изучением условий географической среды, в которой находится объект изучения, что также влияет на оцениваемый результат. За счет факторного смещения $y_j = x_j - x_{0j} = \ln z_j - \ln z_{0j}$ уравнение (4) представляет собой географический инвариант, т. е. выражает фундаментальный закон однофакторной зависимости. Географическим инвариантом также является кофактор y_0 , значение которого не зависит от пространственного положения функциональной системы. Географически обусловлена характеристика условий — величина среднего смещения $x_{0j} = \ln z_{0j}$, разная для различных территорий. Вводя поправки x_{0j} в общее уравнение (4), получаем функции для конкретных ситуаций (см. рис. 1).

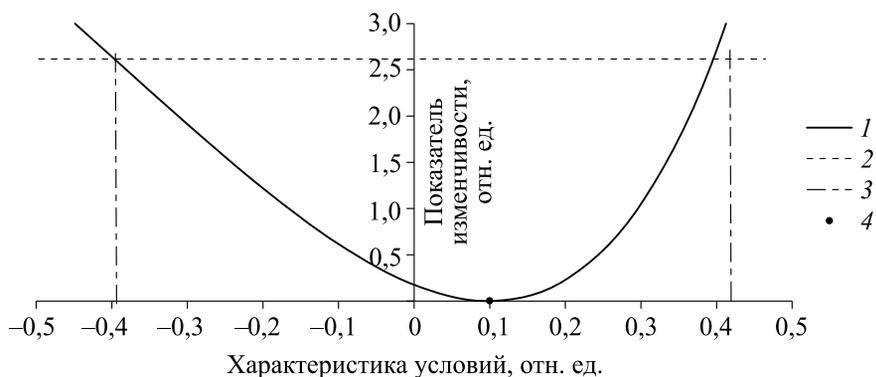


Рис. 2. Изменчивость функции отклика (по уравнению (4)) при варьировании условий среды x_{0j} при фиксированном значении влияющего фактора $x_j = x_{0j}$.

1 — кривая функции отклика; 2 — допустимый уровень изменчивости; 3 — границы области толерантности; 4 — ситуация равенства величины фактора и условий. Критическая величина функции $f_0 = e$ определяет допустимый уровень изменчивости и область толерантности к изменению условий.

В смещении $y_j = x_j - x_{0j}$ величины x_j и x_{0j} находятся в несимметричной позиции, т. е. их взаимная замена приводит к изменению знака переменных $y_j \rightarrow -y_j$, $y_0 \rightarrow -y_0$. Сделав такую замену, из уравнения (4) получаем формулу для вычисления зависимости результата f от условий воздействия x_{0j} . При фиксированной величине факторов x_j в различных условиях ей соответствует одна и та же кривая изменчивости (неустойчивости) системы в данном состоянии x_j (рис. 2). Это третий географический инвариант. Величина отклика $P = P_0 \exp(f)$ резко возрастает при отклонении от фиксированной точки $x_{0j} = x_j$, и есть некоторое критическое значение $f_0 = \ln(P/P_0)$, при превышении которого функциональная система теряет устойчивость в переменной среде x_{0j} . Значение f_0 — четвертый географический инвариант. Результаты исследования критических уровней степенных зависимостей в экологии [38] позволяют предположить, что $f_0 \approx e \approx 2,718$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам эмпирических и теоретических исследований можно сделать вывод, что функциональная география (ФГ) основное внимание уделяет изучению влияния факторов и условий среды, способам их учета в расчетных формулах, анализу критических уровней изменчивости и поиску средовых инвариантов. Через учет особенностей окружающей среды география обеспечивает информационную основу решения задач в иных областях знания и прикладных проблем территориального управления. На примере ФГ хорошо иллюстрируется средовая относительность и географический детерминизм в проявлении законов природы и общества.

Функциональная география в составе теории функциональных систем оперирует с разного рода детерминантами, т. е. различными причинами, определяющими результат соответствующего действия. В их список из перечисленных включаются факторы (z, x, y), условия (z_0, x_0), кофакторы (y_0) с учетом размерности и масштаба величин, эластичность реакции по фактору (a), эластичность замещения факторов (E).

МТ-уравнения (2) недостаточно, чтобы восстановить конкретную форму функциональной зависимости, но оно представляет собой детерминирующее правило для выбора формул. Базовая аксиома ФГ выражена уравнением (3), следующим из (2), и дополнена знанием констант и вида зависимостей функционального типа. Эти формулы и константы становятся географическими инвариантами для анализа функций факторного влияния, причем ФГ должна обращать основное внимание на оценку влияния местных условий среды на проявление законов взаимосвязи, выявлять экстерналии (внешние эффекты), определяющие функциональную специализацию объектов территории. В целом функциональная география служит целям развития средств теоретической интерпретации причинно-следственных связей для понимания закономерностей влияния факторов и условий на изменение компонентных параметров геосистем и реализацию геосистемных функций.

Работа выполнена в рамках программы научно-исследовательских работ Института географии им. В. Б. Сочава СО РАН (№ IX.137.3.), при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (17–05–00588) и Русского географического общества (02/2017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск: Наука, 1978. — 318 с.
2. Черкашин А. К. Полисистемный анализ и синтез. — Новосибирск: Наука, 1997. — 502 с.
3. Черкашин А. К. Полисистемное моделирование. — Новосибирск: Наука, 2005. — 280 с.
4. 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.
5. Meyer A. H. Geography in the teacher education program // Journ. of Geography. — 1948. — Vol. 47, N 3. — P. 97–99.
6. Григорьев А. А. Теоретические проблемы современной физической географии // Развитие и преобразование географической среды. — М.: Наука, 1964. — С. 15–22.
7. Крауклис А. А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. — Новосибирск: Наука, 1979. — 233 с.
8. Марков Ю. Г. Функциональный подход в современном научном познании. — Новосибирск: Наука, 1982 [Электронный ресурс]. — <http://psylib.org.ua/books/marko01/index.htm> (дата обращения 12.04.2016).
9. Вернадский В. И. Записка об основах организации научной геологической работы в Академии наук и в нашей стране // Природа. — 1988. — № 2. — С. 18–27.

10. **Касимов Н. С., Янин Е. П.** Владимир Иванович Вернадский (к 150-летию со дня рождения) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. — 2013. — № 2. — С. 4–11.
11. **Ожегов С. И., Шведова Н. Ю.** Толковый словарь русского языка: 80 000 слов и фразеологических выражений. 4-е изд. — М.: Азбуковник, 1999. — 944 с.
12. **Черкашин А. К., Истомина Е. А.** Исследование и моделирование трансформации структуры и организации ландшафтных комплексов // Изв. РАН. Сер. геогр. — 2017. — № 1. — С. 140–152.
13. **Гомология и гомотопия** / Ред. А. К. Черкашин, Е. А. Истомина. — Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2009. — 351 с.
14. **Солодянкина С. В., Черкашин А. К.** Моделирование высотной структуры ландшафтных геомов Прибайкалья // География и природ. ресурсы. — 2011. — № 2. — С. 141–148.
15. **Судаков К. В.** Функциональные системы. — М.: Изд-во РАМН, 2011. — 320 с.
16. **Дьяконов К. Н.** Функционально-динамическое направление в экспериментальных ландшафтных исследованиях // Изв. РАН. Сер. геогр. — 1997. — № 2. — С. 62–75.
17. **Дьяконов К. Н.** Взаимодействие структурного, эволюционного и функционального направлений в ландшафтных исследованиях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. геогр. — 2002. — № 11. — С. 13–21.
18. **Исаченко А. Г.** Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. — М.: Высш. шк., 1991. — 368 с.
19. **Одум Ю.** Основы экологии. — М.: Мир, 1975. — 740 с.
20. **Базилевич Н. И., Гребенщиков О. С., Тишков А. А.** Географические закономерности структуры и функционирования экосистем. — М.: Наука, 1986. — 298 с.
21. **Григорьев А. А., Будыко М. И.** О периодическом законе географической зональности // Докл. АН СССР. — 1956. — Т. 110, № 1. — С. 129–132.
22. **Groot R. S. de.** Functions of Nature: Evaluation of Nature in Environmental Planning, Management and Decision Making. — Groningen: Wolters-Noordhoff, 1992. — 314 p.
23. **d'Arge C. R., Groot R. de, Farberk S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Suttonk P., den Belt M. van.** The value of the worlds ecosystem services and natural capital // Nature. — 1997. — Vol. 386. — P. 253–260.
24. **Бобылёв С. Н., Захаров В. М.** Экосистемные услуги и экономика. — М.: ООО «Типография ЛЕВКО», 2009. — 72 с.
25. **Gray M.** Comment. Other nature: geodiversity and geosystem services // Environmental Conservation. — 2011. — N 38 (3). — P. 271–274.
26. **Солодянкина С. В., Черкашин А. К.** Экономическая ГИС-оценка растительного потенциала нейтрализации антропогенных выбросов углекислого газа в ландшафтах Юга Восточной Сибири // Вестн. Новосиб. ун-та. Сер. Информационные технологии. — 2014. — Т. 12, вып. 2. — С. 99–108.
27. **Adler P. B., Salguero-Gomez R., Compagnoni A., Hsu J. S., Ray-Mukherjee J., Mbeau-Ache C., Franco M.** Functional traits explain variation in plant life history strategies // Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA. — 2014. — N 2. — P. 740–745.
28. **Римашевская Н. М.** Факторы, влияющие на состояние здоровья населения России // Народонаселение. — 2011. — № 1. — С. 38–49.
29. **Фёдоров В. Д., Гильманов Т. Г.** Экология. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. — 464 с.
30. **Керженцев А. С.** Функциональная экология. — М.: Наука, 2006. — 264 с.
31. **Грибовский С. В.** Оценка доходной недвижимости. — СПб.: Питер, 2001. — 336 с.
32. **Карпович В. Н., Резников В. М.** Некоторые аспекты формализации причинных связей // Философия науки. — 1996. — № 1 (2). — С. 68–79.
33. **Дьяконов К. Н.** Закон количественной компенсации в функциях биосферы А. Л. Чижевского — «сквозной» закон географии (проблема пространства-времени в физической географии) // Развитие идей А. Л. Чижевского в науках о жизни, обществе и Земле. — М.: Гелиос, 2007. — С. 7–14.
34. **Реймерс Н. Ф.** Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы. — М.: Россия молодая, 1994. — 324 с.
35. **Vanteeva J. V., Solodyankina S. V.** Ecosystem functions of steppe landscapes near lake Baikal // Hacquetia. — 2015. — N 14/1. — P. 65–78.
36. **Вантеева Ю. В., Солодянкина С. В., Знаменская Т. И.** Деградация почвенного покрова Приольхонья в связи с интенсивной рекреационной деятельностью // Отражение био-, гео-, антропогенных взаимодействий в почвах и почвенном покрове. — Томск: Изд. дом Том. ун-та, 2016. — С. 269–272.
37. **Кофман Г. Б.** Уравнения роста и онтогенетическая аллометрия // Математическая биология развития. — М.: Наука, 1982. — С. 49–55.
38. **Жирмунский А. В., Кузьмин В. И.** Критические уровни в развитии природных систем. — Л.: Наука, 1990. — 222 с.

Поступила в редакцию 10 октября 2017 г.