Вычислительные технологии **Том 12, Специальный выпуск 2, 2007**

СИСТЕМНЫЕ ОНТОЛОГИИ РАССЛОЕНИЯ ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ЗНАНИЙ*

А. К. Черкашин
Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail: `cherk@mail.icc.ru`

A knowledge presentation model is suggested in terms of product-stratification in the knowledge space. Three types of knowledge are considered as follows: tangent (theoretical), spherical (model) and normal (hierarchical) types of knowledge. This multiplication-stratification approach models the law of universal connection (connectedness) of knowledge, and specifies the structure of the knowledge space. Theories (systemic ontologies) arise as tangent planes at the tangency point of a sphere corresponding to the basic notions and laws (axioms) of a given theory. All points (elements of the stratification base, the core of axiomatics) are connected via interpretation of the basic notions and laws. By the way of example, using this regularity, we construct the core of the theory of functional systems which is employed to annotate scientific texts containing fundamental ecological-geographical knowledge, and construct adequate models of knowledge.

Введение

Интеграция разнообразных эколого-географических данных, знаний и моделей подразумевает создание единой системы, где любая информация об объекте находится на своем месте, обусловленном ее содержанием и значением. Размещение объектной информации (информационного объекта) в пространстве данных и пространстве знаний системно определено, т. е. зависит от множества эмпирических (для данных), структурно-логических (для знаний) и функциональных (для моделей) причин. Создание коллективной экспертно-аналитической системы по пространственно-временной динамике экосистем Сибири требует прежде всего выделить эти причины-основания для типизации и классификации информационных объектов, определения их места в системе знаний. Именно на ее основе должна разрабатываться универсальная компьютерная технология описания структурно-функциональной организации и динамики экосистем как отражение организации пространства знаний (данных, моделей) в виде соответствующих баз данных, знаний и методов структурно-функционального математического моделирования с выходом на оптимальное управление функционированием и динамикой экосистем.

Экология, как и география, — это более чем научная дисциплина и представляет собой проблемно ориентированную систему научных знаний [1]. Интеграция и обобщение

*Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного междисциплинарного проекта СО РАН № 34 “Создание распределенной информационно-аналитической среды для исследований экологических систем”.

существующего массива эколого-географических знаний постоянно занимают исследователей [2–5]. Так, Н.Ф. Реймерс [4] насчитал более 250 теоретических положений, из которых складываются фундаментальные основы экологии. Такой массив эмпирических обобщений невозможен без междисциплинарной интеграции, без типизации известных закономерностей, их отнесения к разным предметным областям системного расслоения накопленных знаний.

Средством для описания знаний являются онтологии — структуры для систематизации, организации, управления и применения научных знаний при решении задач [6–8]. Онтологии призваны системно упорядочить знания и реализовать структуру этого порядка в вычислительных алгоритмах. Системные онтологии возникают как результат расслоения знаний на разных системных основах.

Появление в российской науке термина "системная онтология" связано с работами Г.П. Щедровицкого [9, 10], в которых, в частности, предлагается методология формирования предметных полисистемных онтологий мира путем топического разложения (систематизации) материала с последующим конфигурированием рассматриваемых проекций в целостную систему. Ю.А. Урманцевым предложены своеобразные аксиомы полисистемности [11], которые в специальной трактовке формулируются так: любой объект есть полисистема, каждая моносистема которой принадлежит определенному системному слою соответствующей системной онтологии. Концепция полисистемности положена в основу методологии полисистемного анализа и синтеза [12, 13], где показано, что каждая системная онтология может быть индуцирована по образу общей теории систем (ее базовых понятий и законов) путем замены общесистемных терминов на специальные. Индукция онтологий осуществляется по принципам разработки теоретических схем определенной моносистемной предметной области исследований со специфическим пониманием элементов, связей, структур, организаций и т. д.

Таким образом, пространство знаний расслаивается на подпространства (слои, теории) моносистемных знаний. В этом смысле теория системных онтологий строится в терминах теории математических категорий и дифференциальной топологии. Расслоением называется непрерывное отображение π пространства расслоения X на пространство B (базу расслоения): $\pi : X \to B$. Обратное отображение ($\pi^{-1}(b) = f : B \to X$) представляет пространство X в виде расслоенного множества $Y = \{Y_b\}$, где Y_b — слой над точкой b из множества B. Слои расслоения Y являются результатом своеобразного районирования или типизации пространства X в соответствии со структурой множества B.

Для расслоения пространства знаний X и формирования набора онтологий необходимо выделить свойства этого пространства, по которым элементы X будут относиться к определенному слою (теории, онтологии), базу расслоения B и принцип сравнения элементов из X и B. Расслоенное знание Y есть расслоение пространства знаний X по B (фактор-пространство $Y = X|\,B$). Слой Y_b — это теория типа b, индекс которой b однозначно связан с аксиоматикой этой теории (базовыми понятиями и законами). Все слои тождественны через интерпретацию понятий в системе аксиом разных теорий, поэтому множество теорий $Y = \{Y_b\}$ рассматривается как математическая категория теорий [12] и соответствующих онтологий, связанных отношением интерпретации понятий и другими морфизмами (отношениями подобия).

Понятие "расслоенное пространство" широко используется в дифференциальной геометрии и топологии, в частности в приложениях к касательным расслоениям многообразий. Закономерно предположить, что все моносистемные теории — это касательные

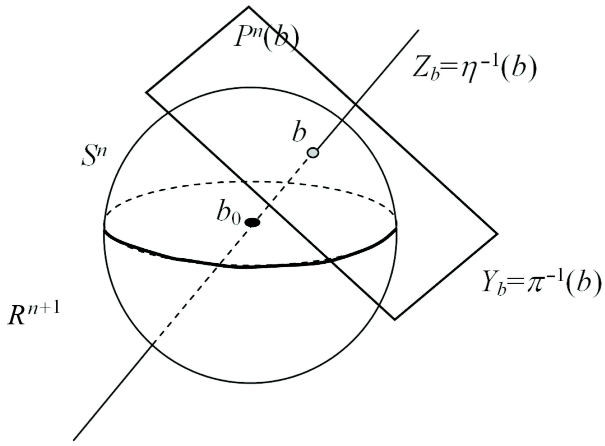

Рис. 1. Структура расслоения пространства знаний

плоскости к некоторому многообразию базовых знаний (базы расслоения); каждая теория аппроксимирует универсальное пространство знаний в своей теоретической касательной плоскости.

Удобную модель такого представления знаний сформируем в терминах теории расслоенных пространств [14] (рис. 1). Рассматривается $(n+1)$-мерное пространство знаний $x \in R^{n+1}$ с включенной в него сферой S^n, элементы (точки) которой $b \in S^n$ составляют базу расслоения знаний. Слоение пространства R^{n+1} задается двояким образом: касательное Y_b и нормальное Z_b расслоение.

Касательное расслоение представлено гиперплоскостью $P^n(b)$, касающейся сферы в точке b. Этот элемент базы расслоения однозначно определяет подмножество знаний $x \in P^n(b)$ теоретического слоя $Y_b = \pi^{-1}(b)$, и в этом смысле b связывается с базовыми понятиями и законами-аксиомами теории $Y_b = P^n(b)$. В таком контексте становится понятно научное содержание точек сферы S^n — это аксиоматики различных теорий и соответствующих им системных онтологий. Сфера S^n является концентрацией научных знаний на уровне базовых понятий и законов, которые перетекают друг в друга при интерпретации специальных терминов, чем обусловлена связность пространства S^n. В этом аспекте все точки S^n эквивалентны.

Нормальное расслоение Z_b состоит из всех точек $x \in R^{n+1}$, лежащих на линии нормали к поверхности сферы S^n в точке b. В данной модели представления знаний слой Z_b является также нормалью к гиперплоскости $P^n(b)$. Очевидно, множество знаний $x \in Z_b$ однозначно определяется элементом базы расслоения b, а именно $x = kb$, где $k \in R$ — изменяется в пределах $(-\infty, \infty)$. При $k = 1$ имеем $x = b$ — элемент аксиоматических знаний, при $k = 0$ будет $x = 0$ — центр сферы, или знание, общее для всех нормальных слоев Z_b (центр пучка конгруэнции Z_b). Каждый слой Z_b непрерывным образом соединяет инвариантный центр пучка $x = 0$ с аксиоматической базой на поверхности сферы радиуса $k = 1$. Знание $x = 0$ есть концентрированное знание обо всем. Величина k определяет значение $b(k) = x/k$ по направлению Z_b. Здесь $b(k)$ — точка на поверхности сферы радиуса k и при $k = 1$ будет $b(1) = b$. Величина k фиксирует расстояние от аксиоматического базиса $b(k)$ до инварианта аксиоматических знаний $b_0 = b(0)$. Вследствие этого величина $s = 1/k$ (кривизна пространства знаний) определяет глубину теоретических обобщений знаний, которые при $k = 0$ достигают бесконечного (сингулярного) значения.

Такая схема позволяет рассматривать сферу S^n как многоуровневое вложение непересекающихся сфер S_k^n индивидуального размера k с общим центром — источником всех знаний b_0 (рис. 1). Понятно, что элемент b_0 и любой элемент $b(k)$ сферы S_k^n определяют луч, индуцирующий на сферах разного диаметра k элементы различных баз расслоения $b(k) = Z_b(k)$ и касательные теоретические слои $Y_b(k) = P_k^n(b)$ к ним. Чем ближе теория $Y_b(k)$ расположена к b_0, тем более фундаментальное значение она имеет, чем дальше — тем более частные (количественные) аспекты она отражает. Понятно, что все теоретические конструкции $Y_b(k)$, лежащие по нормали к одному лучу Z_b, параллельны, т. е. независимы относительно научного вывода. Все аксиоматики $b(k)$ одной сферы логически взаимосвязаны через интерпретацию понятий, а аксиоматики разных сфер связаны через процедуру обобщения (вглубь) или конкретизации (вширь) языка описания. Более частные аксиоматики на широких сферах являются результатом вывода из аксиом фундаментальных теорий.

В итоге любое знание x существует одновременно на лучах знаний Z_b, плоскостях знаний Y_b и на сферах знаний S_k^n и исследуется соответствующими логическими средствами: индуктивным, дедуктивным и модельным (по аналогии) выводами. Любое знание можно обосновать соответствующим способом, и это знание не зависит от способа его получения.

Внутреннее содержание аксиоматической сферы знаний S_k^n для k-го уровня представляет собой вложение, с одной стороны, более фундаментальных сфер знаний, а с другой — лучей обобщений знаний до самого высокого уровня b_0.

Идея единства моделей представления пространства знаний хорошо передается прямыми (декартовыми) произведениями, постулирующими связность элементов знаний. Например, произведение $b_0 \times \{b(k)\}$, представленное множеством паросочетаний $(b_0, b(k))$, постулирует выводимость $b(k)$ из b_0 или сводимость $b(k)$ к b_0, т. е. утверждает существование функций связей $b(k) = \varphi_{bk}(b_0)$, $b_0 = \mu_{bk}[b(k)]$. Произведение $(b(k), x) \in S_k^n \times R^{n+1}$ устанавливает факт потенциальной научной связности аксиоматических элементов $b(k)$ с любым знанием x. Лучше подобные отношения передаются расслоением-произведением $S_k^n \times R^{n+1} \to S_k^n$, которое сопоставляет каждому элементу базы расслоения $b(k)$ функцию связи $(b(k), x)$ обоснования достоверности знания с началом в $b(k) : x = f_x(b(k))$. Очевидно, $(b(k), x)$ при фиксированном b соответствует теоретическому слою $Y_b(k)$, поэтому выделение множества $\{Y_b(k)\}$ есть подрасслоение расслоения-произведения.

Отображение

$$R^{n+1} \times R^{n+1} \to R^{n+1} \tag{1}$$

увязывает все знания в единую конструкцию, поскольку утверждает существование отношения (x, y) для любого знания $x,\ y \in R^{n+1}$, т. е. любое знание выводимо из любого с последовательным использованием средств индуктивного (движения по лучу нормали), дедуктивного (в плоскости теории) и модельного (по поверхности сферы) вывода. Маршруты движения (x, y) от знания x к знанию y есть логическая функция доказательства истины: $y = f(x)$. Совокупность таких функций задает порядок в пространстве знаний, *структуру пространства*, нормирующую связи между знаниями.

Расслоение-произведение

$$S_k^n \times R^{n+1} \to S_k^n \tag{2}$$

по смыслу есть подрасслоение расслоения (1), постулирующего не только единство аксиоматик с любым знанием, но и связь любого знания с любым. Именно этот постулат (1) является базовым и совпадает по содержанию с элементом b_0, задающим метазнание, суть которого в *связности*, *структурированности знаний*.

Эта позиция позволяет распространить модель представления знаний на всю реальность и постулировать в виде (1) *принцип всеобщей связи* процессов и явлений, изучение которых проводится по схеме (1) путем теоретического расслоения наблюдаемых закономерностей на системно однородные области (теории и системные онтологии).

1. Ядро системной теории

Выражение (2) допускает дополнительную конкретизацию $S_k^n \in R^{n+1}$ в форме

$$S_k^n \times S_k^n \to S_k^n, \tag{3}$$

утверждающую связность аксиоматических систем разных теоретических слоев: все аксиоматики являются моделью (аналогами) друг друга. Связь реализуется через процедуру интерпретации понятий [12, 13]. В силу (3) можно выбрать аксиоматику любой теории в качестве базовой для индукции понятий и аксиом другой теории, например общую теорию систем (ОТС), точнее, теорию общих систем, т. е. систем в обобщенном их понимании. Любая система S_i есть объединение подсистем $S_{ij} : S_i = \bigcup\limits_j S_{ij}$. В системе S_i выделяется подмножество подсистем $S_{ik} = \{S_{ijk}\}$, объединение части (K_j) которых порождает любую подсистему $S_{ij} \in S_i : S_{ij} = \bigcup\limits_{k \in K_j} S_{ijk}$. Они называются элементами системы S_i. Все множество систем объединяется в универсальную систему $S = \bigcup\limits_i S_i$, которая трактуется как мир. Мир и каждая его система в силу введенных определений наделены топологической структурой с универсальным базисом $S_k = \{S_{0k}\}$ из элементарных частиц, объединение которых порождает все системы S_i, их подсистемы S_{ij} и частные элементы S_{ijk} подсистем S_{ij}. Топологические свойства S позволяют использовать результаты математической топологии для системного анализа.

Существование связей систем и элементов систем следует из принципа (1) в приложении к S:

$$S \times S \to S \tag{4}$$

— все системы взаимосвязаны, т. е. в топологическом смысле являются открытыми множествами. Постулат (4) утверждает принцип системности: *все есть система*. Согласно (4) система определяется как структура ее подсистем или элементов. Структура связей системы называется организацией системы.

Распространяя модель представления знаний (рис. 1) на системы в общем их понимании, автоматически приходим к следующим выводам.

1. Нормальное расслоение по лучу определяет:

а) существование иерархии систем;

б) различие систем по направлениям луча.

2. Касательное расслоение определяет:

а) наличие разных типов (слоев) систем;

б) зависимость всех свойств систем от типа систем.

3. Сферическое расслоение определяет существование классификации как структуры связи типов систем одного уровня; классификация строится и по вертикали (иерархии) и по горизонтали (внутри уровня иерархии); классификационные позиции нижнего уровня определяются позициями верхнего уровня (выводимы из них).

Эти принципиальные выводы определяют структуру пространства исследования систем. Особо хотелось бы обратить внимание на вывод 2б: все, что происходит с системой, зависит от ее типа (типологически обусловлено). Это напрямую связано с типологией эколого-географических систем, например, при выделении типов леса по Б.П. Колесникову [15] в основу положено сходство последовательностей восстановительных стадий лесов. Типология географических фаций по В.Б. Сочаве [16] связывает тип фации с определенным природным режимом — совокупностью природных процессов, протекающих в границах фации. Это является теоретической основой интерпретационного картографирования [17] — перевода ландшафтно-типологических карт в карты производного тематического содержания. Аналогом такого подхода становятся ситуационные модели знаний [18], когда каждой ситуации соответствует свое решение.

Общесистемная связь согласно (1) формируется как структура взаимообратных отношений $S_1 \leftrightarrow S_2$, которые назовем воздействиями $B_{12}(S_1 \to S_2)$ и $B_{21}(S_1 \leftarrow S_2)$. Связь V_{12} определим как структуру объединения парных воздействий ($V_{12} = B_{12} \cup B_{21}$), а действие — как разность воздействий ($D_{12} = B_{12} - B_{21},\ D_{21} = B_{21} - B_{12}$). Объединение парных действий ($D_{12} \cup D_{21}$) называется взаимодействием. Коренным здесь является понятие действия, порождающего изменения в системах. Изменением назовем любое различие систем: $\Delta S_{12} = S_1 - S_2$. Это могут быть как пространственные, так и временные различия, хотя в ОТС понятия "пространство" и "время" не определены. Дополнительно определяется существование C как некоторого инварианта, сохраняющегося при любых изменениях. Утверждение "система существует" записывается как тождество: $S_i \equiv C$. Это означает, что существует только особый класс систем с инвариантом, а остальные системы изменяются под внешним действием.

Перечисленные понятия формируют понятийное ядро ОТС и соответствующей системной онтологии (рис. 2). Отношения понятий задают систему аксиом [12, 13]:

$$\forall S_i \forall \Delta S_i \forall D_i : \quad 1) S \equiv C; \quad 2) \Delta S \equiv C; \quad 3) \Delta S_i \equiv D_i. \tag{5}$$

Здесь два закона — 1 и 2 справедливы только для универсальных систем и один универсальный закон для любых систем 3. Аксиомы 1 и 2 постулируют существование C и изменение ΔS универсальной системы мира S и его аналогов (инвариантов). Аксиома 3 утверждает закон, что всякое изменение ΔS_i есть результат действия D_i, или в философской трактовке — всякое движение есть борьба противоположностей (действий). Остальные системные знания выводимы из (5) логически.

Путем интерпретации понятий ядра тезауруса ОТС переходим к новой теории, например теории функциональных систем. Эта теория моделирует проявление причинно-

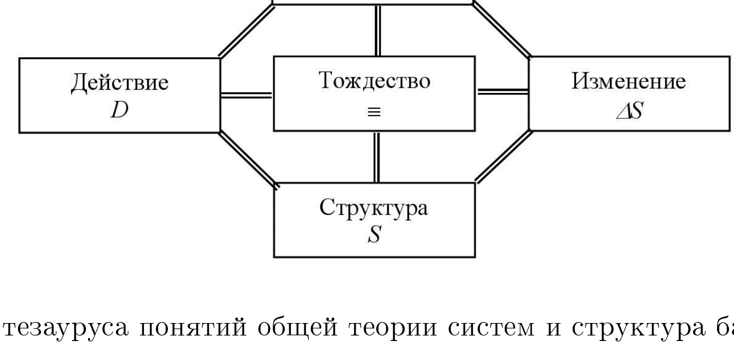

Рис. 2. Ядро тезауруса понятий общей теории систем и структура базовых знаний

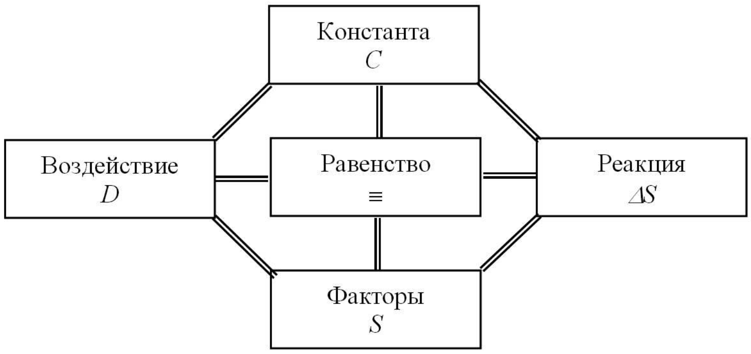

Рис. 3. Ядро тезауруса понятий теории функциональных систем и структура ее базовых отношений

следственных связей $x \to y$ в среде H. Ядро понятий соответствующей онтологии создается на базовых понятиях (рис. 3): факторы, воздействие, реакция. Воздействие (в смысле системного действия) равно произведению влияния факторов x и среды H: $D = Hx$. Реакция $\Delta S = y$ эквивалентна воздействию:

$$y = Hx \tag{6}$$

— новое знание, следующее из структуры этой онтологии. Если, как следует из рис. 3, имеет место равенство $x = C = \text{const}$, то система находится в оптимальном режиме функционирования [13].

Пространство знаний теории функциональных систем X (см. рис. 1) складывается из факторов влияния и реакций на них: $x \in X$, $y \in X$. Из (1) для этого случая следует $X \times X \to X$, или $(x, y) \to x$. В итоге формируется последовательность причинно-следственных связей $(x, y) \to (y, z)$. Функциональные отношения являются бинарными, т. е. одна причина соответствует одному следствию.

Как в общесистемной теории, пространство функциональных систем обладает специальными свойствами (иерархии, индивидуальности, типологии, классификации). Существует иерархия факторов, и каждый фактор верхнего уровня определяет факторы нижнего уровня в касательном слое, т. е. частные факторы объединяются в комплексные факторы вплоть до самого высокого уровня b_0 (первопричина). Факторная иерархия в определенном смысле моделирует общую иерархию систем и может быть основой для классификации систем. Таким путем пошли географы и экологи, разрабатывая системы факторально-динамических рядов [19] и факторной ординации [20].

В общем случае уравнение (6) описывает кривую годографа — линию, изображаемую концом вектора (x, y), начало которого находится в начале координат [13]. Угол наклона вектора несет информацию для определения значения $H(x)$ — характеристики условий внешней среды. Этим достигается однозначная связь элементов прямого произведения $(x, y) \in X \times X$ с x: из начала координат откладываем вектор по направлению $H(x)$ до точки (x, y) его пересечения с вертикальной линией $x = x$. Знание положения точки (x, y) дает возможность оценить y для данного x при условиях $H(x)$. Этот пример иллюстрирует частное проявление общего принципа всеобщей связи (1) (расслоения-произведения) для функциональных систем, выражающееся в соответствии элемента x вектору годографа.

Обычно переменные в моделях экологических систем работают в логарифмическом масштабе. Зависимость (6) в этом случае развертывается в следующее уравнение [13]:

$$\ln y - \ln y_0 = H_0 \exp[a(\ln x - \ln x_0)](\ln x - \ln x_0), \tag{7}$$

где проведена замена $x \to \ln x - \ln x_0$, $y \to \ln y - \ln y_0$, $H \to H_0 \exp[a(\ln x - \ln x_0)]$. Точка $(\ln x_0, \ln y_0)$ имеет смысл опорной точки вектора годографа (локальное начало координат). Величина $\ln y_0$ — экобаза (порог), ниже значения которой функциональная система нечувствительна к воздействиям, поэтому $\ln x_0$ — минимальное значение фактора, ниже которого влияние меньше порогового $\ln y_0$. Уравнение (7) в новых координатах (x, y) имеет различные графики [13]. Экстремальное значение (7) наблюдается при

$$\ln x = \ln x_0 - 1/a = c_0 = \text{const}, \tag{8}$$

где a — константа. В общем случае $\ln x$ — это комплексный показатель частных факторов

$$\ln x_i : \ln x = \sum_i \alpha_i \ln x_i, \tag{9}$$

где α_i — весовой коэффициент проявления (важности) фактора в конкретном местообитании ($\sum\limits_i \alpha_i = 1$).

2. Выявление и экспертиза знаний

Для использования предлагаемых моделей и методов в конкретных исследованиях необходимо сформулировать решаемую проблему на специальном системном языке. Это же требуется делать при чтении научных текстов для выявления новых знаний и развития предлагаемых решений теоретическими средствами.

При анализе текста и его аннотировании необходимо выявить ключевые слова и фразы, которые бы указали на их связь с одной или несколькими предметными областями исследований. В предлагаемой схеме представления знаний просматривается несколько типов таких указателей.

1. Идентификация по названию системной теории: теории общих, функциональных, динамических, механических и других систем. Появление в тексте соответствующих понятий указывает на предметную область исследования, хотя неоднозначно, например, термин “динамическая система” встречается в разных смыслах в статистической и механической интерпретации.

2. Выявление связей с философскими категориями, выражающими основной (третий) закон соответствующей теории, например “причинно-следственные связи”. Если текст проинтерпретировать в философских категориях, то результат укажет на теоретическую принадлежность. В частности, анализ количественно-качественных переходов касается законов развития динамических систем (смены состояний).

3. Индикация терминов понятийного ядра теории и связанных с ними понятий и законов.

В работе Г.С. Розенберга и Ф.Н. Рянского [5] представлен набор научных обобщений, имеющих отношение к экологической тематике. Анализ соответствующего текста с целью его аннотирования и включения в систему знаний той или иной теории проведем на примере раздела по факториальной экологии (с. 73). Она изучает воздействие среды на компоненты экосистем. Воздействие среды на компоненты исследуется всеми науками, каждая из которых по-своему понимает смысл действия среды и те изменения, которые это действие вызывает. Такой общесистемный подход нуждается в конкретизации.

Авторы [5] отмечают, что нельзя трактовать отношения среды и компонентов как "односторонние причинно-следственные зависимости". Это явное указание на группу философских категорий, которые связаны с определенной теорией, а именно теорией функциональных систем. В правильности этого вывода убеждаешься при анализе используемых понятий: экологический фактор, приспособительные реакции, местообитание как среда и др. Факторы типизируются на биотические и абиотические, прямые и косвенные, ведущие и второстепенные и т. д. Совокупность связанных факторов называется комплексным градиентом — это распространенный вариант представления ведущего фактора.

Теоретическая конструкция обладает научной значимостью, если она может объяснить существующие закономерности, сформулированные на языке данной теории, и вывести новые законы, пополнив арсенал знаний. В факториальной экологии существует ряд эмпирических обобщений (концепций), представленных часто формулами, но отсутствуют аксиоматика и доказательство теорем [5].

Пример — концепция совокупного действия природных факторов (Э. Митчерлих, Б. Бауле). Смысл этого знания состоит в том, что изменение значения любого фактора влияет на реакцию организмов. Влияние на биомассу (урожай) описывается дифференциальным уравнением и его решением

$$\frac{dy}{dx_i} = k_i(Y_i - y), \quad y = Y_i(1 - \exp(-k_i x_i)), \tag{10}$$

где k_i — коэффициент влияния i-го фактора x_i; Y_i — максимальная или минимальная биомасса, которая достигается при очень больших значениях x_i. Обобщенное решение (по Б. Бауле) имеет вид

$$y = Y \prod_i (1 - \exp(-k_i x_i)).$$

У этих уравнений много недостатков: недоучет логарифмического масштаба влияния факторов, искусственный характер объединения влияния факторов, несоответствие некоторым экологическим закономерностям реакции организмов на факторы среды, например колоколообразной форме кривой реакции с максимумом величины реакции.

Все эти особенности учитывает уравнение (7), которое позволяет утверждать, что действительно любой фактор влияет на организм, но с учетом иерархии факторов, местных особенностей влияния α_i и характеристик самого вида $(a, H_0, \ln x_0, \ln y_0)$.

Другая гипотеза компенсации (замещения) экологических факторов (В.В. Алехин, З. Рюбель) утверждает, что отсутствие или недостаток некоторых экологических факторов может быть компенсирован каким-либо другим аналогичным фактором. Это утверждение буквально следует из (8), если его переписать в виде $\sum_i \alpha_i \ln x_i = \mathrm{const}$. Иными словами, при оптимальном функционировании живого организма недостаток одного фактора может быть компенсирован другими факторами. Кроме того, компенсация может быть достигнута варьированием внешних условий α_i, в частности, за счет хозяйственных мероприятий. Для неоптимальных условий это правило не нарушается; при постоянном дефиците влияния факторов $\ln Z$ $(\ln x - \ln x_0 + \ln Z = -1/a)$ компенсаторные эффекты также будут иметь место.

Использующийся термин “аналогичные факторы” подразумевает типизацию факторов по качествам, возможность их объединения в группы и расчет комплексного фактора. Принцип компенсации работает для любых факторов и их комплексов в зоне оптимума. В тех случаях, когда значение фактора близко к нулю или бесконечно большому значению ($\ln x \to \pm\infty$) и при $a < 0$, величина $\ln y \to \ln y_0$ — пороговое значение ($y \equiv y_0$). Это означает, что полное отсутствие или избыток какого-либо фактора делает невозможным существование организмов и их сообществ.

Подобные закономерности отражены в принципе лимитирующих факторов (законы минимума Ю. Либиха и толерантности В. Шелфорда). Этот эффект в уравнении (7) теоретически связан с логарифмическим масштабом влияния факторов. Но бывают ситуации, когда недостаток, например света, слабо влияет на организмы. Этот эффект можно объяснить очень низким весом α_i фактора в данной ситуации, поэтому любое его значение нивелируется. Напротив, существуют фундаментальные факторы, существование жизни без которых невозможно. Они имеют подавляющее экологическое значение ($\alpha_i \approx 1$), по сравнению с которым воздействие других факторов несущественно. Этот результат объясняет содержание гипотезы незаменимости фундаментальных факторов (В.Р. Вильямс).

Г.С. Розенберг и Ф.Н. Рянский [5] сформулировали несколько положений, дополняющих принцип Либиха — Шелфорда. В частности, “организмы могут иметь широкий диапазон толерантности в отношении одного фактора и узкий в отношении другого”. Экспертиза этого высказывания в рамках онтологии функциональных систем с использованием соотношений (7)–(9) требует определения термина “диапазон толерантности”. Здесь необходимо помнить, что факторы имеют неодинаковую размерность и сравнение диапазонов по температуре и влажности требует относительного сравнения, поэтому в качестве величины диапазона толерантности i-го фактора принято отношение $k_i = x_{i2}/x_{i1}$, где x_{i1}, x_{i2} — соответственно нижняя и верхняя границы диапазона. Диапазон определяется всеми теми значениями x_i, для которых значение реакции экосистемы на воздействие факторов в A раз превышает пороговую величину: $y = Ay_0$. Отсюда для комплексного показателя x согласно (7) запишем

$$f\exp(f) = \frac{a}{H_0}\ln A, f = a(\ln x - \ln x_0). \tag{11}$$

При малых значениях f отклонения x от порогового значения x_0, что наблюдается на границах диапазона толерантности, будет $f^2 + f = \dfrac{a}{H_0}\ln A$. При $\dfrac{a}{H_0}\ln A = 1$ или $\ln A = \dfrac{H_0}{a}$ корни этого уравнения соответствуют золотому сечению: $f_1 = -1.618$, $f_2 = 0.618$. Иными словами, при выборе $A = \exp\dfrac{H_0}{a}$ в единицах f значения границ диапазона строго фиксированы показателями золотого сечения, а ширина интервала $f_2 - f_1 = 2.236$. Следовательно, $x_2/x_1 = \exp(2.236/a)$ — величина диапазона в соотношении золотого сечения определяется видоспецифичным коэффициентом a. Более простой случай $A = 1$, когда реакция y соответствует пороговому значению y_0. Здесь $f_1 = -1$; $f_2 = 0$ и $f_2 - f_1 = 1$, $x_2/x_1 = \exp(1/a)$. Этот интервал у́же диапазона золотого сечения. В общем случае

$$x_2/x_1 = \exp(B/a), \quad B = \sqrt{1 + 4\frac{a}{H_0}\ln A}.$$

Для многофакторного влияния заменим выражение для x согласно (9) и получим

$$\prod_i k_i^{\alpha_i} = \exp\left(\frac{B}{a}\right). \tag{12}$$

Здесь значение $\exp(B/a)$ выступает в качестве инварианта произведения диапазонов толерантности разных факторов с весовыми коэффициентами α_i. Если $\alpha_i = 0$, то фактор i не участвует во взаимодействии (игнорируется в расчетах). Для наглядности рассмотрим двухфакторную систему (i, j) с одинаковыми весами $\alpha_i = \alpha_j$.В этом случае

$$k_i k_j = \exp\left(\frac{B}{a\alpha_i}\right), \tag{13}$$

что говорит об обратно пропорциональной зависимости между диапазонами разных факторов. Данное утверждение и уравнение (12) подтверждают гипотезу, что увеличение диапазона толерантности по одному фактору уменьшает этот диапазон по другому действующему ($\alpha_i \neq 0$) фактору.

Другое положение сформулировано так: “обычно наиболее широко распространены организмы с широким диапазоном толерантности в отношении одного фактора” [5, с. 80]. Вопросы распространения организмов относятся к числу частотного анализа их встречаемости в границах определенной территории и описываются уравнениями (7), где y — частота встречаемости, x — факторная характеристика. Показатель y_m широкой (наибольшей) распространенности находится из (7) при условии (8):

$$\ln\frac{y_m}{y_0} = \frac{H_0}{ae}.$$

Он зависит только от видоспецифических коэффициентов. В связи с этим зависимость y_m от ширины диапазонов k_i может быть только условной и опосредованной такими коэффициентами. Например, выделив отношение H_0/a и заменив его в правой части (12) при $B = H_0$ выражением $\dfrac{H_0}{a} = e\ln\dfrac{y_m}{y_0}$, получим

$$y_m = y_0\prod_i k_i^{\alpha_i/e}, \tag{14}$$

т. е. широта распространения вида прямо зависит от величины диапазона по каждому фактору; при преобладании какого-либо фактора ($\alpha_i = 1$) такая зависимость становится явной ($y_m = y_0 k_i^{1/e}$). Так доказывается аннотируемое положение при некоторых дополнительных условиях и пояснениях.

Третье положение утверждает, что “если условия по одному экологическому фактору неоптимальны для вида, то может сузиться диапазон толерантности к другим экологическим факторам” [5, с. 80]. Здесь аналитическая связь также условна и осуществляется через инвариантные соотношения в условиях дефицита факторов $\ln Z = -1/a - (\ln x - \ln x_0)$. Выразим отсюда $1/a$ и подставим в правую часть (12) при $B = 1$: $\dfrac{x_0}{xZ} = \prod_i k_i^{\alpha_i}$.

Между величиной дефицита факторов и диапазонов толерантности выявляется обратная зависимость, т. е. рост дефицита сопряжен с уменьшением диапазонов.

Второе и третье положения правильно формулировать как сопряженные, а не причинно-следственные корреляции.

Четвертое положение [5, с. 80]: "оптимальные значения экологических факторов для организмов в природе и в лабораторных условиях оказываются различными". Это связывается с гипотезой компенсации экологических факторов и различием фундаментальной и реализованной экологических ниш. Уравнение (7) для $y(x)$ является моделью экологической ниши, определяя области толерантности организма в сложной среде (x_i, α_i). Условия оптимальности задаются соотношениями (8), (9), из которых следует, что при изменении положения оптимума $y_m(x)$ по одному фактору изменяется его положение по другому фактору. Аналогичные перестройки происходят при изменении типа среды (набора α_i), которые для природных и лабораторных условий различны. Фундаментальная ниша определяется оптимальными условиями среды, а реализованная — имеющимся набором факторов и типом среды.

Пятое, последнее положение: "Период размножения является критическим, и многие экологические факторы в этот период становятся лимитирующими при общем сужении диапазона толерантности". Данное положение коррелирует с правилом неоднозначного действия факторов, когда экологические факторы по-разному влияют на разные функции организма на различных этапах его индивидуального развития. Эти эффекты можно объяснить колебанием видоспецифического коэффициента a: его рост приводит к снижению правой части уравнения (12) до 1, когда диапазоны толерантности уменьшатся до 1, т. е. перестанут существовать (верхняя и нижняя границы диапазонов совпадают). Согласно (8) аналогичные изменения смещают зону оптимума к критическим значениям x_0, когда максимальное значение реакции также становится критическим $y_m = y_0$. Считавшееся эффективным влияние фактора по мере роста a становится пессимальным.

Заключение

Формирование системных онтологий для эколого-географических исследований определяется такими тремя группами закономерностей, как:

1) строение пространства знаний, расслоение его на касательные, нормальные и сферические подпространства, роль касательных элементов (ядер) в формировании содержания касательного теоретического слоя;

2) формирование ядер разных аксиоматических теорий и развитие теорий на этой основе;

3) экспертиза научных текстов на предмет выявления новых знаний и проверки существующих на адекватность теоретическим положениям разных системных онтологий.

Онтологии создаются как теоретические конструкции по общей схеме формирования базовой системы понятий и законов теории и проверки ее возможностей на конкретных примерах. В таком аспекте системная онтология, по существу, не отличается от процесса развития научной теории. Единственно, разнятся цели теоретических и онтологических исследований: онтология нацелена на формализацию и компьютеризацию теоретических знаний и умений, чтобы сделать их общедоступными как в экспертизе, так и при использовании знаний.

Список литературы

[1] Предисловие к работе В.Н. Данилова-Данильяна, Э.В. Гирусова и др. Экология и экономика природопользования. М.: Закон и право. ЮНИТИ, 1998.

[2] Преображенский В.С., Макаров В.З. Развитие ландшафтоведения в СССР // Теоретические и общие вопросы географии: Итоги науки и техники ВИНИТИ АН СССР. М.: ВИНИТИ, 1988. 200 с.

[3] Преображенский В.С., Александрова Т.Д., Куприянова Т.П. Основы ландшафтного анализа. М.: Наука, 1988. 192 с.

[4] Реймерс Н.Ф. Экология. Теории, законы, правила, принципы и гипотезы. М.: Россия молодая, 1994. 324 с.

[5] Розенберг Г.С., Рянский Ф.Н. Теоретическая и прикладная экология. Нижневартовск: Изд-во Нижневар. пед. ин-та, 2005. 292 с.

[6] Козодоев А.В., Привезенцев А.И., Фазлиев А.З. Организация информационных ресурсов в распределенной информационно-вычислительной системе, ориентированной на решение задач молекулярной спектроскопии // Тр. IX Раб. сов. по электронным публикациям — El-Pub 2004: Вычисл. технологии. 2005. Т. 10. Спецвыпуск. С. 82–91.

[7] Sowa J.F. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. Brooks Cole Publishing Co., Pacific Grove, CA, 2000. 594 p. (Top-Level Categories, `http://www.jfsowa.com/ontology/toplevel.htm`)

[8] Овдей О.М., Проскудина Г.Ю. Обзор инструментов инженерии онтологий. 2005. `http://www.impb.ru/~rcdl2004/cgi/get_paper_pdf.cgi?pid=26`

[9] Щедровицкий Г.П. Философия. Наука. Методология. М.: Шк. культ. политики, 1997. 656 с.

[10] Щедровицкий Г.П. Избранные труды. М.: Шк. культ. политики, 1995. 800 с.

[11] Урманцев Ю.А. Общая теория систем — состояние, приложения, перспективы развития // Система, симметрия, гармония. М.: Мысль, 1987. С. 38–130.

[12] Черкашин А.К. Полисистемный анализ и синтез. Приложение в географии. Новосибирск: Наука, 1997. 502 с.

[13] Черкашин А.К. Полисистемное моделирование. Новосибирск: Наука, 2005. 280 с.

[14] Хьюзмоллер Д. Расслоенные пространства. Новокузнецк: ИО НФМИ, 2000. 440 с.

[15] Колесников Б.П. Состояние советской лесной типологии и проблема генетической классификации типов леса // Изв. СО АН СССР. 1958. № 2. С. 109–122.

[16] Сочава В.Б. Геотопология как раздел учения о геосистемах // Топологические аспекты учения о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1974. С. 3–86.

[17] Ландшафтно-интерпретационное картографирование. Новосибирск: Наука, 2005. 424 с.

[18] Шестаков Р., Полищук И., Фирстов Е. Теория экономических информационных систем. http://www.nyagan.ru/~shram/index1.html

[19] Крауклис А.А. Проблемы экспериментального ландшафтоведения. Новосибирск: Наука, 1979. 233 с.

[20] Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 327 с.

Поступила в редакцию 11 мая 2007 г.