

## ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИОЦЕНОЛОГИИ ДЛЯ ЭКОИНФОРМАТИКИ

*Канд. технических наук И.И. Потатов, Е.В. Древал*

(Всероссийский институт научной и технической информации РАН, Москва,  
ipotatov37@mail.ru)

Обсуждены задачи конструктивного рассмотрения экологических проблем с применением алгоритмических средств экоинформатики. Отмечено, что для использования моделей процессов в окружающей среде необходимо развивать методы формализации понятий биоценологии и создавать алгоритмы обработки больших потоков данных, доставляемых системами экологического мониторинга. В данной работе введены идентификаторы природных объектов, позволяющие формализовать процедуру моделирования с рассмотрением сценариев их изменения. Также отмечено, что в научной литературе не существует единой признанной системы таких идентификаторов.

## CONCEPTS AND DEFINITIONS OF BIOCENOLOGY FOR ECOINFORMATICS

*I.I. Potatov, E.V. Dreval*

The problems of constructive consideration of ecological problems are discussed to be the applications of algorithmic tools of ecoinformatics. It is marked that using the models of environmental processes needs the development of the methods for the formalization of biocenology notions and creation of algorithms for big data processing delivered by ecological monitoring systems. This paper introduces identifiers of natural objects what allows the formalization of modeling procedure with the consideration of scenarios for their change. It is noted also that scientific literature does not have unique system of such identifiers that was recognized.

### Введение

Экоинформатика является наукой о природно-антропогенных системах и их взаимодействии [1-3]. Для нее характерны процессы дифференциации и интеграции, требующие в зависимости от предметной области исследования либо глубокое проникновение в содержательную часть изучаемой системы, либо ее представление в виде части единого целого. В области биоценологии эти аспекты проявляются с особой наглядностью, когда требуется, из всего многообразия наземных экосистем выделить только те типы, которые являются характерными для принятой пространственной сетки

дискретизации земной поверхности. К сожалению, в настоящее время нет установленных терминов, которые бы однозначно идентифицировали подсистемы окружающего нас мира. Многие авторы вкладывают различную смысловую нагрузку в такие термины, как биосфера, экосистема, биогеоценоз, биом, геосистема, окружающая среда. С точки зрения информатики разработка методов обработки данных и моделей функционирования природно-антропогенных систем такие расхождения не являются принципиальными, так как не влияют на содержательную часть формализованных конструкций информатики. Эти расхождения могут проявляться лишь на этапе интерпретации результатов обработки данных или моделирования.

Взаимосвязь информатики и биоценологии в основном лежит в таких областях знания, как математическое моделирование и мониторинг. Поскольку природа систем биоценологии определяется совокупностью абиотических и биотических факторов, то применение методов информатики в биоценологии требует более детальной классификации этих факторов. Одним из важных факторов является воздействие климата на особенности распределения растений. Для каждого типа растений существует запаздывание реакции на изменение температуры. Задача моделирования такой зависимости является предметом исследования многих работ. По существу здесь речь идет о сукцессии растительного покрова, как при изменении климата, так и при его антропогенном нарушении в результате пожаров и вырубки. Многообразие идей и методик исследования корреляций в биоценологии порождается проблемой нестационарности климатических процессов. Поэтому привлечение стохастических механизмов для анализа иерархии циклов изменения климата является одним из направлений экоиформатики.

Экоиформатика для применения своих методов требует определенного уровня формализации. Например, в многих работах вводится зональная классификация типов земных покровов. Эта классификация привязывается к типам климатических ситуаций, пример которых охарактеризован в табл. 1. Такая классификация упрощает процедуру пространственной привязки биоценологических процессов при их моделировании или при формировании баз данных биоценологии. Безусловно приведенный пример является одним из многочисленных вариантов попыток многих исследователей формализовать структуру окружающей среды (Барцев, Почекутов, 2015).

Классификационный аспект биоценологии важен для применения количественных методов при формализованном описании динамики различных параметров наземных экосистем. Так модели круговоротов некоторых химических элементов биосферы были бы невозможны без разделения почвенно-растительных формаций на однородные категории. Наиболее известной классификацией почвенно-растительных формаций является классификация, приведенная на рис. 1 и в табл. 2. Другие классификации можно найти в базе данных World Resources Institute, доступной через сеть интернет.

Уровень детальности описания наземной экосистемы определяется многими обстоятельствами. Специалисты конкретных областей биоценологии изучают различные стороны функционального поведения компонентов экосистем. Задача экоиформатики - объединить получаемые знания и дать новое знание, являющееся продуктом синтеза информационных потоков из различных научных направлений. Так, например, фитоценология изучает физиологию растений, процессы их конкуренции за свет, биогенные элементы и пространство. И вот именно здесь не обойтись без методов экоиформатики, дающих возможность на формальном уровне сформулировать поведение отдельного растения или их сообщества как целенаправленное, подчиненное определенной стратегии.

**Экологическая классификация типов земных покровов с привязкой к характерным климатическим зонам [2]**

Климатическая зона	Характерные особенности зоны	
	Тип почвы	Тип растительности
1. Экваториальная	бурые глины	вечнозеленые леса
2. Тропическая	красные глины	листопадные леса или саванна
3. Субтропическая	сероземы, каменистые, пустынные и соленые почвы	пустынная растительность
4. Средиземноморская	коричневые земли	древесная растительность
5. Теплый умеренный климат	красные или желтые лесные почвы	умеренные вечно зеленые леса
6. Холодный умеренный климат	коричневые и серые лесные почвы	широколиственные листопадные леса
7. Континентальная	чернозем, бурые и серые почвы	Степи
8. Бореальная	Подзольные почвы	Тайга
9. Полярная	тундра	низкорослая растительность

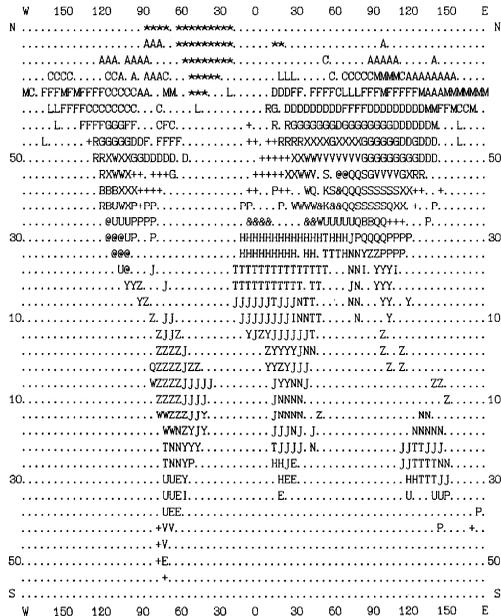


Рис. 1. Почвенно-растительные формации по географической сетке 4°×5°. Обозначения в табл. 2.

## Идентификатор типов почвенно-растительных формаций [2]

Тип почвенно-растительной формации	Идентификатор
Арктические пустыни и тундры	A
Высокогорные пустыни	B
Тундры	C
Средне-таежные леса	D
Пампы и травяные саванны	E
Северо-таежные леса	F
Южно-таежные леса	G
Субтропические пустыни	H
Субтропические и тропические травяно-древесные заросли тугайного типа	I
Тропические саванны	J
Солончаки	K
Лесо-тундра	L
Горная тундра	M
Тропические ксерофитные открытые редколесья	N
Осиново-березовые подтаежные леса	O
Субтропические широколиственные и хвойные леса	P
Альпийские и субальпийские луга	Q
Широколиственные хвойные леса	R
Суббореальные и солончковые пустыни	S
Тропические пустыни	T
Ксерофитные редколесья и кустарники	U
Сухие степи	V
Степи умеренно засушливые и засушливые (в том числе горные)	W
Лесостепи (луговые степи)	X
Переменно-влажные листопадные тропические леса	Y
Влажные вечнозеленые тропические леса	Z
Широколиственные леса	+
Субтропические полупустыни	&
Суббореальные и полынные пустыни	@
Мангровые леса	#
Отсутствие растительности	•

Теория живучести сложных систем позволяет сформулировать модель организации фитоценозов, ориентируясь на гипотезу о целенаправленности эколого-ценотических стратегий растительного сообщества. Процесс выживания растений рассматривается не как взаимное приспособление конкретных видов, а более обобщенно, как сосуществование видов с разными адаптивными стратегиями. Каждое растение или их группа в конкурентной борьбе за существование может варьировать элементы своей стратегии: изменять распределение корней по почвенным горизонтам, перестраивать соотношение надземной и подземной частей растения, изменять требования к экологической нише. Поэтому привлечение методов теории живучести сложных систем способствовало бы более полному пониманию механизмов успешности в растительных сообществах.

Биоценологический аспект экоинформатики особенно проявляется в сферах антропогенного воздействия на окружающую природную среду. Речь идет о ландшафтной экологии и сельскохозяйственных экосистемах.

Методы эконоинформатики позволяют формализовать схему взаимодействия факторов, формирующих ландшафт и приводящих к появлению потенциальной растительности на месте уничтоженной человеком. В ландшафтной экологии уже имеются формализации, использование которых может помочь при синтезе соответствующих моделей ландшафтной сукцессии. Например, существует четырехуровневая иерархия единиц ландшафта: экотоп, микро-, мезо- и макрохора. Однако уже в предметной области существуют разногласия между различными авторами по типизации территориальных неоднородностей в растительных сообществах различного ранга, вызванных внутренними ландшафтными связями. Поэтому привлечение системных методов эконоинформатики с ее возможностями имитационного эксперимента поможет стандартизировать понятия ландшафтной экологии с учетом вмешательства человека.

В области агроэкологии внедрение методов эконоинформатики диктуется необходимостью создания таких технологий оценки энергетических потоков в управляемых экосистемах, которые бы обеспечивали необходимые уровни их энергетической поддержки. В самом деле, удельные энергозатраты в индустриальном сельском хозяйстве на порядок выше, чем в естественных экосистемах. Человек сознательно уменьшил видовое разнообразие в агроэкосистемах, чтобы увеличить урожайность полезных для него видов, взяв управление энергетическими потоками на себя. Поэтому при рассмотрении биогеохимических циклов необходимо введение соответствующих коррекций, например, путем внесения изменений в табл. 2. Ведь многообразие агроэкосистем, не учитываемое в глобальных биосферных моделях, существенно снижает их достоверность.

### **Системный подход в биоценологии**

Практические задачи рационального использования и воспроизведения ресурсов биосферы требуют количественного исследования внутренней природы составляющих ее сообществ организмов (биоценозов). Это, в частности, необходимо при исследовании продуктивности Мирового океана, структуры и функционирования населяющих его сообществ, а также при оценке состояния рекреационных зон. Использование одних биохимических методов для решения этих задач оказывается принципиально недостаточным. Необходимо привлечение биоценотических методов. Последние в отличие от биохимических методов не имеют под собой такой прочной количественной основы, которые дают физика и химия.

Количественной основой биоценологии служит кибернетика, точнее тот ее раздел, который называют теорией сложных систем. Проявлением этой теории в биоценологии являются многочисленные модели конкретных биоценозов, которые нацелены на решение задач прогнозирования их динамики и на поиск технологий для управления этой динамикой. Достаточно популярными в этом направлении являются модели Лотки-Вольтерра и их многочисленные модификации, преследующие цель внести в модель фактор лимитирования отдельных функций биоценоза параметрами окружающей среды. К сожалению, все эти модели имеют только теоретический характер и служат предметом исследования упрощенной фазовой структуры идеализированного биоценоза. Попытки усложнения модели с целью учета в ней реальных процессов приводят к сложным системам дифференциальных уравнений в частных производных, для определения численных значе-

ний коэффициентов которых требуются достаточно емкие полевые исследования. Такое положение в биоценологии оказывается правилом, а не исключением. Попытка выразить экологические концепции в виде формул или других формализованных конструкций тесно связана с необходимостью натуральных измерений. Следовательно, математическое моделирование в биоценологии служит обоснованием необходимости тех или других измерений, оставаясь в тоже время самостоятельным научным направлением.

Биологические системы имеют иерархическую структуру. Низшим ее уровнем являются одноклеточные организмы, высшим – биосфера. Биосистема  $A$  определяется своей структурой  $|A|$  и поведением  $\bar{A}$ . Не будет нарушением каких либо экологических законов, если предположить о существовании у биосистемы некоторой цели  $\underline{A}$ . Вряд ли можно сомневаться в том, что стратегической целью любой биосистемы является стремление выжить самой или способствовать выживанию биосистемы высшего иерархического уровня. Однако, тактические цели биосистемы, способствующие осуществлению стратегической цели не очевидны.

Биосистемы являются открытыми системами. Это означает их взаимодействие со средой  $B$ , которая, вообще говоря, включает и другие биосистемы. Взаимодействие биосистемы со средой состоит в обмене между ними веществом, энергией и информацией. Набор требований биосистемы к среде называется ее нишей. Биосистемы с одинаковыми нишами могут рассматриваться как одна и та же жизненная форма. Если описывать требования биосистемы к среде значениями некоторых параметров, заданных в определенных диапазонах, то ниша может быть определена некоторой областью в соответствующем многомерном параметрическом пространстве. Каждый элемент биосистемы также может быть описан некоторым набором параметров, а связи между элементами биосистемы в этом случае представляется как зависимость между соответствующими параметрами. Другими словами, биосистема  $A$  может быть описана  $N$  параметрами  $\bar{x}(t) = \{x_i(t), i = 1, \dots, N\}$ , зависящими от времени  $t$ . Структура  $|A(t)|$  и поведение  $\bar{A}(t)$  биосистемы являются функциями этих параметров. Поэтому  $A(t) = F(\bar{x}(t))$ . Следовательно, траектории системы  $A$  во времени соответствует некоторая кривая в  $N$ - мерном евклидовом пространстве.

Моделью системы  $A$  будем называть абстрактное образование  $A_M(t) = F_M(\bar{x}^M(t))$ , зависящее от  $M$  компонент вектора  $\bar{x}(t)$   $\{\bar{x}^M(t) \in \bar{x}(t), M \leq N\}$  и учитывающее, вообще говоря, не все имеющиеся между ними связи. Очевидно, что при  $M \rightarrow N$  рассогласование между траекториями самой системы и ее модели должно уменьшаться. Мера рассогласования выбирается в форме любого естественного критерия, например, в виде максимума разности соответствующих координат траекторий или некоторой их функции.

Заметим, что моделирование биоценозов, имеющих пространственное распределение, является современным эквивалентом классических экспериментальных исследований. Основным принципиальным препятствием на этом пути является многомерность фазового пространства, преодоление которой часто становится невозможным. Поэтому от математического моделирования не следует требовать большего, чем оно может дать. В развитии виде математические модели в основном выполняют объяснительную

функцию, позволяя воспроизводить отдельные процессы в природе в ускоренном масштабе времени и давая возможность без вмешательства в реальные процессы оценивать влияние вариаций отдельных характеристик на динамику систем окружающей среды. Имеющие практическое значение модели биоценозов как правило близки по сложности к объектам моделирования и поэтому часто теряют объяснительный характер. Преодоление возникающих здесь проблем связано с использованием модели лишь как элемента более сложной конструкции, такой как ГИМС [1-3].

Пусть ниша биосистемы  $A(t)$  описывается  $L$  параметрами  $\{c_j(t), L < N\}$ , лежащими в пределах  $a_j \leq c_j(t) \leq b_j$  ( $j=1, \dots, L$ ). Тогда связь биосистемы с окружающей средой можно описать системой уравнений:

$$G_j(\{x_i(t)\}) = c_j(t), \quad (j=1, \dots, L).$$

Все системы, параметры которых удовлетворяют этим соотношениям, образуют класс  $\Xi$ . Введем некоторый целевой функционал на траектории системы  $A(t)$ :

$$V = f(\{x_i(t)\})$$

Пусть величина  $V$  достигает максимума при  $\{x_{i,0}(t)\}$  на траектории  $A_{opt}(t)$ . Решением этой экстремальной задачи являются зависимости  $N$  параметров оптимальной системы от  $L$  ее характеристик:

$$x_{i,0} = H_i[c_1(t), \dots, c_L(t)],$$

что позволяет снизить размерность модели. Формируя множество тактических целей системы  $\Xi = \{\underline{A}_1, \dots, \underline{A}_n, \dots, \underline{A}_m\}$  и устанавливая экспериментально или на экспертном уровне корреляции  $A_{r,opt}(t) = g(\underline{A})$ ,  $\underline{A} \in \Xi$ , приходим к ограниченному набору возможных оптимальных моделей, траектории которых можно сопоставлять с траекторией  $A(t)$  и по заданному критерию близости решать и обратную задачу:

$$\underline{A}_{-r,0} = g^{-1}(A_{r,0,opt}(t))$$

Что касается определения множества тактических целей, то на уровне популяции таковыми являются хищничество, паразитизм, мимикрия и др. Сложнее обстоит дело с определением этих целей уже на уровне биоценозов. Здесь телеологическая проблема связана с пониманием категорий целенаправленности, целесообразности и разумности как проявлений эффективности биосистемы. Задача в какой-то степени облегчается, когда биоценоз является частью хозяйственной системы.

## Литература

1. Крапивин В.Ф., Thanh Trai, Vui Ta Long, Назарян Н.А. Применение ГИМС технологии в экологическом мониторинге территории Южного Вьетнама. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 1997, №7, с. 93-114.

2. Ниту К., Крапивин В.Ф., Потапов П.П. Глобальный климат и проблемы устойчивого развития. Бухарест, Румыния: Matrix Rom, 2017, 600 с.

3. Крапивин В.Ф., Varotsos С.А., Soldatov V.Yu. New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making. Springer, London, U.K., 2015. 903 pp.

4. Kelley J.J., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А., Потапов П.П. Индикатор биосложности в глобальной экоиформатике. Proceedings of the XIII International Symposium on Ecoinformatics Problems, 4-6 December 2018, Moscow. The Moscow Sciences Engineering A.S. Popov Society for Radio, Electronics . and Communication, -M.: 16-21 pp.

5. П.П. Потапов Наземные экосистемы и глобальный круговорот углерода. Proceedings of the XIII International Symposium on Ecoinformatics Problems, 4-6 December 2018, Moscow. The Moscow Sciences Engineering A.S. Popov Society for Radio, Electronics . and Communication, -M.: 153-159 pp.