УДК 581.524+536.75+514+519.7

ОСНОВЫ ТЕОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗНООБРАЗИЯ ЭКОСИСТЕМ БИОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЖИВЫХ СИСТЕМ

[1]Ланкин Ю.П., [2] Иванова Н.С*, [3]Басканова Т.Ф.

[1]Институт биофизики СО РАН, Красноярск
Красноярск, Россия (660036, г. Красноярск, Академгородок) lan7@mail.ru
[2]Ботанический сад УрО РАН, Екатеринбург
Екатеринбург, Россия (620144, г. Екатеринбург, ул. 8-Марта,202) i.n.s@bk.ru
[3]Сибирский федеральный университет, Красноярск
Красноярск, Россия (660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79) tfbask@mail.ru

В работе рассматриваются трудности формализации описания биосферы и ее экосистем, существующие в математической экологии. В целях построения универсальных экосистемных моделей предлагается использовать такие фундаментальные свойства живых систем, как аттрактивность, адаптивность, фрактальность, сетевая организация. Выявляется огромный диапазон возможностей моделей адаптивных сетей. Указывается на сходство их структуры со структурой взаимосвязанных сетей организмов, процессов и циклов в экосистемах. Сетевые модели перекрывают широкий диапазон модельных представлений – от фундаментальных, механизменных до имитационных. Приводится краткое описание Концепции Адаптивной Самоорганизации сложных систем (КАС), позволяющей выйти на разрешение проблемы глобального кризиса биосферы. Предлагаются основы построения математических методов моделирования экосистем в методологии КАС.

Ключевые слова: экология, экосистемы, биосфера, математическое моделирование, концепция адаптивной самоорганизации, сети, фракталы, хаос, сложные системы, прогнозирование.

THE FOUNDATIONS OF THE THEORY TO MODELLING OF BIOSPHERE ECOSYSTEMS DIVERSITY ON THE BASIS OF FUNDAMENTAL PROPERTIES OF LIVE SYSTEMS

[1]Lankin Y.P., [2]Ivanova N.S., [3]Baskanova T.F.

[1]Institute of Biophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk
Krasnoyarsk, Russia (660036, Akademgorodok) e-mail: lan7@mail.ru
[2]Botanical Garden of Ural Branch RAS, Yekaterinburg
Yekaterinburg, Russia (620144, Yekaterinburg, 8th March Str., 202) i.n.s@bk.ru
[3]Siberian Federal University, Krasnoyarsk
Krasnoyarsk, Russia (660041, 79 Svobodny Prospect) e-mail: tfbask@mail.ru

In this work the difficulties for formalization of biosphere and its ecosystems descriptions, existing in mathematical ecology were considered. In order to build universal ecosystem models, such fundamental properties of living systems as attractiveness, adaptability, fractality and network organization were offered. The huge range of opportunities of adaptive network models was revealed. The similarity of their structure with the structure of interconnected networks of organisms, processes and cycles in ecosystems was indicated. A network models overlap a wide range of model representations; from fundamental, mechanistic to imitating. The brief description of the Concept of Adaptive Self-organization of complex systems (CAS) allowing to find a solution to the problem of the global crisis of the biosphere, was offered. The basics for construction of mathematical methods for ecosystems modeling in the methodology of CAS were proposed.

Key words: ecology, ecosystems, biosphere, mathematics modeling, conception of adaptive self-organization, networks, fractals, chaos, complex systems, prediction.

В предыдущей статье [8] мы рассмотрели базовые представления о проблемах современной науки и путях их преодоления. Эти проблемы выразились, в частности, в огромном разрыве между математической и экспериментальной (полевой) экологией. Сложившаяся ситуация сильно затрудняет исследование биосферы и ее экосистем из-за невозможности охвата фантастической сложности живых систем в рамках качественных представлений без использования количественных моделей.

Однако, опираясь на возможности существующих математических методов: «…мало надежды на то, что удастся быстро создать всеобъемлющую теорию описания и моделирования экологических систем. Более реально рассмотреть возможность построения новых подходов к описанию частных экологических ситуаций» [14]. Неспособность методов математической физики, переносимых в биологию и экологию, отразить всю сложность, гибкость и поливариантность живых систем, подтверждается мнением другого автора: «Однако на фоне определенных успехов в описании биологических подсистем и процессов (…) успехи биофизики в познании общих свойств живого (биологии, кстати, тоже) более, чем скромны» [1]. Отсюда понятно и следующее высказывание: «Если математизация биологии возможна, то *нужна своя математика*» [17].

Цель данной работы – показать основные трудности математического моделирования экологических систем на основе традиционных методов, рассмотреть предлагаемые Концепцией Адаптивной Самоорганизации сложных природных систем (КАС) пути преодоления этих трудностей и предложить модификацию алгоритмов адаптивной самоорганизации, обеспечивающих взаимное согласование экосистемных процессов в моделях биосферы и ее экосистем.

Трудности математизации

При экологическом моделировании сложных природных систем, таких как биосфера и ее экосистемы, исследователь сталкивается со следующими проблемами: «Каждое отдельное действие или вмешательство в систему обретает коллективный аспект, который может повлечь за собой совершенно неожиданные глобальные изменения. …Не только каждое состояние системы, но и само определение системы в том виде, в каком ее описывает модель, обычно нестабильно или по крайней мере метастабильно. …Очень часто отклик системы на возмущение оказывается противоположным тому, что подсказывает нам наша интуиция. …Мы приучены мыслить в терминах линейной причинности, но теперь нуждаемся в новых "средствах мышления"» [13].

Это высказывание одного из основателей синергетики, делает понятным трудности математической экологии, рассмотренные в предыдущем разделе. А также поясняет необходимость создание новой, "своей" математики для моделирования эко- и биосистем, которая сможет отразить парадоксальные свойства живой природы.

Приступая к моделированию экологической сложности, мы также оказываемся перед вопросом о ее вычислимости при моделировании биосферы и ее эволюции. Этот вопрос вероятно разрешим с помощью теории вычислительной сложности, «…занимающейся изучением ресурсов, необходимых для вычисления данных вычислительных задач. …существует прямая связь между теорией эволюции и квантовой теорией. …Законы физики, как мы их понимаем сейчас, допускают универсальность вычисления. …Эволюция никогда бы не произошла, если бы задача передачи определенных свойств … не была *легко обрабатываемой* (т.е. вычислимой в течении разумного периода времени) при использовании в качестве компьютеров легко доступных молекул» [4]. Автор цитаты апеллирует к новому направлению в вычислительной технике – квантовым компьютерам. К счастью, при моделировании, уровень необходимой сложности выбирается исследователем и, с математической точки зрения, основным требованием является достаточное, для имитации требуемых функций экосистемы, число элементов (уравнений модели) и связей между ними.

Сложность биосферы и ее экосистем парадоксальна. Видимая необозримость этой сложности складывается из множества простых, однотипных количественных преобразований (циклов). Идеализированными математическими примерами таких операций являются формирование фракталов и вычисления в сетях. Это свойство «простоты в сложности» позволяет надеяться построить математические методы описания биосферных и экосистемных процессов на сочетании однотипных операций в сетях с процессами адаптивной самоорганизации их структуры.

Концепция Адаптивной Самоорганизации

Очевидно, что создание всеобъемлющей теории должно опираться на фундаментальные свойства экологических и биологических систем, такие как: сетевая организация элементов и связей системы, адаптивность, аттрактивность (наличие множества стационарных состояний, обеспечивающих динамическую устойчивость экосистем), фрактальность (самоподобие структур и процессов), нелинейность, цикличность, сложность организации (большое число видов и взаимосвязей между ними повышает устойчивость экосистемы) и др.

К сожалению, ни одна из современных теорий не содержит математических методов, способных вместить в себя все это многообразие ключевых свойств живых систем. В основном, эти свойства моделируются в изоляции друг от друга. Вместе с тем, возможности экосистем зачастую реализуются в сложных комбинациях перечисленных свойств, взаимодействующих друг с другом. Упомянутые особенности живых систем дают представление о том, какими свойствами должна обладать математическая теория, предназначенная для создания количественных моделей биосферы и ее экосистем.

В последние десятилетия в науке появился ряд перспективных направлений, опираясь на достижения которых можно попытаться подойти к построению всеобъемлющей экологической теории, позволяющей отразить перечисленные свойства живых систем. Очевидно, что в основе такой теории должен лежать системный подход, позволяющий рассматривать экосистемы и биосферу как адаптивные самоорганизующиеся системы (потенциально способные к порождению, развитию и поддержанию устойчивости жизни), а не как искусственные механизмы стереотипного повторения одних и тех же кривых при заданных начальных условиях. Заметим, что речь идет не об отрицании ценности классических методов, а о необходимости новых идей, позволяющих сформировать обобщенный подход к разнообразию экосистем биосферы.

Рассмотрим кратко некоторые научные направления, основные идеи которых могут лечь в основу всеобъемлющей теории. В связи с ограниченным объемом статьи, упомянем, помимо теории систем, лишь те научные направления, которые удобны для иллюстрации рассматриваемых идей.

Процессы самоорганизации природных систем рассматривает синергетика [13, 16], в которую влились методы теории катастроф [3]. Благодаря ее открытиям стала понятна ограниченность классической парадигмы линейной причинности, введено фундаментальное понятие открытой системы, объяснены причины устойчивости и парадоксального поведения множества сложных систем окружающего мира. В последнее время ее достижения обогатились теорией синергетического управления [7], уже позволившей уточнить законы тяготения.

Самоподобие как сходство сложных структур на разных масштабах отражено в теории фракталов [12]. Правильные (математические) фракталы получают простыми итеративными процедурами. В своей нынешней форме теория фракталов связана с теорией хаоса [6]. Детерминированный хаос представляется в современной науке не как беспорядок, а как сложная форма порядка с большим числом степеней свободы. Здесь же возникает понятие фрактальных (нецелых) размерностей, проявляющихся во многих сложных процессах. Для анализа степени самоподобия обычно используется показатель Херста.

Работа со сложностью эффективно ведется в нейроинформатике. К настоящему времени на счету нейроинформатики огромное число достижений в решении разнообразных задач науки и техники и солидный арсенал математических методов [15]. Во многих ее моделях не накладывается ограничений на максимально возможное число связей и элементов (формальных нейронов) нейронной сети.

Тщательный анализ проблемы показал, что построение теории, способной предложить методы моделирования столь сложных объектов, как биосфера и ее экосистемы, возможно на основе творческого синтеза наиболее плодотворных идей, предложенных рассмотренными науками. К настоящему времени этот синтез выполнен в Концепции Адаптивной Самоорганизации сложных природных систем (КАС) [9, 10].

Как известно, вид аттракторов задается в синергетике управляющими параметрами. В КАС установлено, что вид аттрактивного ландшафта системы определяется связями (и другими коэффициентами) иерархической сети ее элементов. Они играют роль управляющих параметров в процессах самоорганизации системы.

Синергетика декларирует наличие аттракторов и аттрактивных ландшафтов, определяющих законы нелинейной динамики природных систем. Однако не обсуждаются причины появления аттракторов и способы их формирования. Для решения этой фундаментальной проблемы в КАС введено понятие самоорганизации управляющих параметров. Динамическую самоорганизацию аттрактивного ландшафта предложено осуществлять алгоритмами адаптивной самоорганизации (самостоятельной адаптации), разрабатываемыми в рамках КАС [12, 18]. Разработку и апробацию таких алгоритмов удобно вести на базе методологии нейронных сетей. Важными преимуществами предложенного подхода являются: возможность использования богатого опыта нейроинформатики в создании математических методов и возможность прямого применения полученных алгоритмов в задачах обработки информации. В отличие от традиционных специализированных алгоритмов нейроинформатики, универсальные алгоритмы КАС создаются с учетом их функционирования в моделях природных систем. Ниже будет приведен пример перехода от нейросетевых методов к сетевым методам моделирования.

Парадоксально, но рост сложности и точности упрощает анализ поведения моделей, поскольку самоорганизация «сжимает» сложность до небольшого числа степеней свободы. Другие соответствия с экосистемами проявляются в росте устойчивости модели с ростом ее сложности и в идентичности процессов самоорганизации на всех уровнях иерархии экосистем и для разных систем. Появляется возможность выхода за, так называемый, «горизонт прогноза», постулированный теорией «русел и джокеров», обусловленный, вероятно, простотой используемых моделей.

Следует отметить, что в привычной для экологов терминологии, аттрактивный ландшафт представляет собой множество стационарных состояний, обеспечивающих устойчивость биосферы и ее экосистем. КАС предлагает объяснение причин формирования областей стационарности и методы их формирования в экосистемных моделях.

Заметим, что в основу КАС легли не сами математические методы рассмотренных выше наук, а ряд их базовых идей, позволивших отразить фундаментальные свойства биосферы и ее экосистем.

Методы моделирования экосистем

В экологии изучение видов традиционно идет в рамках популяционного подхода, когда подробно и детально изучается только один вид. Сложность межвидовых связей и взаимодействий при таком подходе, как правило, не учитывается. Однако глубокое понимание функционирования живого требует учета сети этих связей и взаимодействий, приводящих к множественным нелинейным эффектам в динамике изучаемой экосистемы. Без использования количественных методов такие эффекты часто невозможно спрогнозировать и учесть их последствия. Во многих случаях здесь могут оказаться бессильными и простые математические модели, сталкивающиеся с так называемым «горизонтом прогноза».

Рассмотрим использование методов КАС на простом примере построения модели лесных экосистем на основе логистических уравнений [5]. Моделируется восстановление после рубок древесного яруса сосняка брусничникового (рис. 1), произрастающего в

Зауральской холмисто-предгорной провинции на вершинах гор и склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами и неустойчивым режимом увлажнения.

Рис. 1. Сосняк брусничниковый, произрастающий на крутых склонах южной экспозиции с мелкими каменистыми почвами (10–15 см) в Зауральской холмисто-предгорной провинции (Средний Урал)

Для описания динамики плотности (фитомассы) двух взаимодействующих видов – сосны и березы, их взаимовлияния в процессе формирования древостоя в [5] предложена система дифференциальных (связанных логистических) уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= A_1 x_1 - B_1 x_1^{\,2} + C_1 x_1 x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= A_2 x_2 - B_2 x_2^{\,2} + C_2 x_1 x_2 \end{aligned}, \qquad (1)$$

где x_1 – плотность (надземная масса, г/м^2 в абсолютно сухом состоянии) сосны; x_2 – плотность березы; A, B, C – параметры, которые определяются в процессе решения обратной задачи.

Добавление числа взаимосвязей с другими видами или факторами в модели ведет к усложнению вида уравнений. По мере увеличения числа видов и факторов такой традиционный способ конструирования уравнений достаточно быстро делает модель необозримой. Изменение связей требует аккуратного переписывания уравнений и тщательной проверки корректности выполненных операций во избежание появления ошибок из-за сложности записи. При использовании неоднородных уравнений, задача усложняется многократно.

Для перехода к более простому представлению, удобному для выполнения массовых операций в адаптивных сетях, представим эту систему уравнений следующим образом

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i - B_i x_i^{\,2} + C_i \varphi(x_1, \cdots, x_j), \qquad (2)$$

где i – номер текущего уравнения, а j – номера уравнений, воздействующих на текущее, функция $\varphi(x_1, \cdots, x_j)$ описывает взаимовлияние видов. Как уже указывалось, адаптивная сеть в моделях КАС является математическим отображением взаимодействия видов, растений и/или животных в экосистемах с учетом их взаимосвязей.

Сделаем замену последнего слагаемого в правой части

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i - B_i x_i^2 + C_i \sum_j w_{ij} x_i x_j \ , \qquad (3)$$

где w_{ij} – величина связи между i-м и j-м видами, определяющая влияние j-го вида на i-й. Предложенное изменение позволяет легко представить модель из неограниченного числа уравнений. Эти уравнения описывают виды растений в экосистеме и взаимосвязи между ними. При необходимости, связи могут быть представлены в нелинейной форме.

Те же результаты моделирования можно получить и в более простой форме, удобной для сетевых вычислений

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i - B_i x_i^2 + C_i \sum_j w_{ij} x_j \ . \qquad (4)$$

В модель могут быть добавлены уравнения для травянисто-кустарничкового яруса, почвы, других компонентов экосистемы и т.д. Это сделает ее уравнения неоднородными, но расширит возможности описания. Упрощения представления можно добиться разбиением уравнений на однородные группы.

Кроме того, уравнения можно дополнить соответствующим членом (аналогичным операции суммирования в правой части) для отображения внешних воздействий на компоненты экосистемы, например, климатических. Это дает ряд новых возможностей по сравнению с традиционными способами представления экосистемных моделей. Здесь мы опустим это дополнение, чтобы не усложнять дальнейшие описания.

Наличие или отсутствие конкретной связи между уравнениями модели может быть отражено, например, следующим образом

$$q_{ij} = \begin{cases} 0, & x_i \geq x_j \\ w_{ij} x_j, & x_i < x_j \end{cases} . \qquad (5)$$

В нелинейных режимах функционирования эта величина может играть роль параметра порядка. При этом уравнение (4) примет вид

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i - B_i x_i^2 + C_i \sum_j q_{ij} \ . \qquad (6)$$

Изменение статуса связи (5) может выполняться автоматически в процессе моделирования. Например, в процессе роста древостоя вид деревьев второго яруса перерос вид деревьев первого яруса. При этом, выросшие деревья перестали испытывать затенение кронами бывшего первого яруса и, с другой стороны, сами стали его затенять. Изменение взаимовлияния выразится в автоматическом переключении типа связей в модели. При моделировании динамики смены видов (сукцессии) такие переключения могут происходить неоднократно. Можно также представить моделирование множественности линий развития лесных экосистем в пределах одного конкретного типа леса и т.д.

Разумеется, рассмотренные простые примеры далеко не исчерпывают возможностей экосистемного моделирования методами КАС.

Особенностью моделей КАС является присутствие в них методов адаптивной самоорганизации, отражающих соответствующие фундаментальные свойства экосистем. Для их реализации в модели может быть использован один из методов КАС [11, 18]. Их использование настолько облегчает формирование моделей, что появляется возможность моделировать рост конкретного леса с точностью до дерева, если имеются соответствующие данные.

Для исследователя эколога применение методов адаптивной самоорганизации модели не должно создавать особых дополнительных трудностей. В процессе развития теории они будут реализованы в виде стандартного программного обеспечения, как, например, это делается для методов решения систем дифференциальных уравнений в математическом пакете MathCAD, использованном в предыдущей публикации [5].

Методы (алгоритмы) адаптивной самоорганизации [11, 18] разработаны для настройки нейронных сетей на основе алгебраических уравнений, функционирующих в дискретном времени. Далее мы продемонстрируем, как изменить их для непрерывного времени, что необходимо для решения систем дифференциальных уравнений на примере системы уравнений (4), полученной из (1). Напомним, что в данном случае модель представлена адаптивной сетью, состоящей из видов деревьев в экосистеме. А также, что рассматриваемые далее процедуры могут учитывать внешние воздействия (например, климатические) на моделируемую экосистему путем незначительного усложнения уравнений.

Метод I (подстановка известных значений) представлен парами циклов функционирования c и c+1. Первое (оценочное) функционирование

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = A_i x_i^c(t) - B_i\left(x_i^c(t)\right)^2 + C_i \sum_j w_{ij} x_j^c(t), \tag{7}$$

где x_i – решение i-го (текущего) уравнения модели, x_j – решения j-го уравнения модели, w_{ij} – величина связи между i-м и j-м уравнениями, определяющая влияние j-го уравнения на i-ое.

Целевая функция (функция невязки), определяющая качество адаптации

$$H = \frac{1}{N} \sum_i \left(\int_{T_0}^{T_1} \left(s_i(t) - x_i^c(t)\right)^2 dt \right)_i , \tag{8}$$

где s_i – требуемое решение уравнения, известное, например, из экспериментальных данных, полученных в полевых исследованиях, N – число уравнений в модели (в случае использования формулы (5), это число для $q_{ij} \neq 0$). Это выражение представляет собой нормированную сумму оценок по всем $i = 1 \ldots N$ уравнениям модели на заданном промежутке времени функционирования модели $T = T_1 – T_0$ при непрерывном вычислении ошибки для каждого уравнения (в рассматриваемой модели – вида деревьев).

Возможен также дискретный вариант представления целевой функции, когда оценка выполняется в определенные моменты времени функционирования модели, для которых имеются измеренные значения s_i моделируемой величины

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i,k} \left(s_i^k - x_i^{k,c}\right)^2 , \tag{9}$$

где k – номер контрольной точки с известным значением s_i.

Второе (тестовое) функционирование

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = A_i x_i^{c+l}(t) - B_i\left(x_i^{c+l}(t)\right)^2 + C_i\left(\sum_l w_{il} s_l(t) + \sum_j w_{ij} x_j^{c+l}(t)\right), \tag{10}$$

где l – номер уравнения (вида деревьев в модели), влияющего на текущее уравнение ($j \neq l$). Фактически, первая сумма в формуле (10) означает замену получаемых x_i на требуемые значения s_i.

Для каждого уравнения сетевой модели может быть вычислено выражение

$$\Delta x_i(t+\tau) = x_i^{c+l}(t+\tau) - x_i^c(t+\tau), \tag{11}$$

представляющее собой величину и направление требуемого изменения x_i на текущем шаге адаптации, где τ – время отклика системы (например, задержка реакции видов в экосистеме на внешнее воздействие: изменение солнечной активности, погодных условий, антропогенное загрязнение и др.).

Важно отметить, что наличие задержки τ является обязательным условием возникновения динамических переходных процессов в любых системах. В случае отсутствия τ, экосистема превратилась бы в «следящую систему». В ответ на произвольное воздействие следовала бы мгновенная реакция системы, пропорциональная величине воздействия.

Формула для модификации силы (весов) связей при адаптации сети

$$w_{ij}^{m+l} = w_{ij}^{m} + \Delta w_{ij}^{m} \delta , \tag{12}$$

где m – номер цикла адаптации, δ – скорость адаптации.

Для непрерывного вычисления ошибки (8) получим

$$\Delta w_{ij}^{m} = \int_{T_0}^{T_1} x_j(t) \Delta x_i(t+\tau) dt , \tag{13}$$

а для дискретного (9), соответственно

$$\Delta w_{ij}^{m} = \sum_k x_j^k \Delta x_i^{k+1} . \tag{14}$$

Метод II (стремление к стационарным состояниям) не требует использования второго (тестового) функционирования системы уравнений (10). Вместо него используются результаты предыдущего функционирования (7), а формулу (11) можно переписать в виде

$$\Delta x_i(t+\tau) = x_i(t) - x_i(t+\tau) . \tag{15}$$

Целевая функция (8) принимает вид

$$H = \frac{1}{N} \sum_i \left(\int_{T_0}^{T_1} \left(x_i(t) - x_i(t+\tau) \right)^2 dt \right)_i , \tag{16}$$

что указывает на стремление сети, моделирующей экосистему, к стационарному состоянию. Остальные формулы сохраняются.

Метод приводит к тому же эффекту, что приравнивание к нулю производных при аналитическом решении. Однако в рассматриваемом случае выполняется решение систем дифференциальных уравнений с изменяющимися коэффициентами. Такие решения весьма нетривиальны и в настоящее время получены лишь для ограниченного класса задач. В сочетании с проблематичностью возможности формализации систем с неограниченным, способным изменяться числом элементов, связей и аттракторов, сложными иерархическими структурами, при неопределенном диапазоне внешних воздействий (внешние воздействия – не характерная для классических моделей особенность) говорить об аналитических решениях не приходится.

В КАС существуют и другие методы адаптивной самоорганизации, однако задачей данной работы не является их всестороннее рассмотрение.

При необходимости отобразить определенные воздействия или группы воздействий, как внешние по отношению к моделируемой экосистеме, уравнения могут быть изменены следующим образом

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i - B_i x_i^{\,2} + C_i \sum_j w_{ij} x_j + D_i \lambda_i , \tag{17}$$

либо для множественных воздействий

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i - B_i x_i^{\,2} + C_i \sum_j w_{ij} x_j + D_i \sum_z v_{iz} \lambda_z , \tag{18}$$

где λ_z – внешнее воздействие (например, климатическое), z – номер этого воздействия, а v_{iz} – сила (вес) данного воздействия на данное уравнение (в рассматриваемой модели – на данный вид деревьев), D – параметр, аналогичный A, B и C, описанным для системы уравнений (1). Несложно дополнить приведенные выше методы адаптивной самоорганизации процедурой коррекции v_{iz}.

Существует ряд теорем, доказанных разными авторами, обосновывающих универсальные возможности вычислительных сетей, к которым относятся и рассматриваемые нами модели. Так, в работе [2] «показано, что можно получить сколь угодно точное приближение любой непрерывной функции многих переменных, используя операции сложения и умножения на число, суперпозицию функций, линейные функции а также одну произвольную непрерывную нелинейную функцию одной переменной».

Отсюда, во-первых, следует, что замена нелинейной функции из работы [11] на нелинейную функцию логистического уравнения из работы [5] (или на любую другую нелинейную функцию) не влияет на вычислительные возможности полученной сети.

Во-вторых, способность генерации сетью любой непрерывной функции предоставляет возможность формирования нелинейных аттрактивных ландшафтов не вследствие аналитического вывода уравнений для потенциальных функций, как это сделано в [5], а путем неявного автоматического их формирования в процессе адаптивной самоорганизации модели экосистемы. Это снимает ограничение на размерность и сложность получаемого потенциального рельефа и позволяет перестраивать его прямо в процессе функционирования модели. Так можно моделировать сукцессии, последствия рубок, антропогенных воздействий и другие динамические режимы перестройки свойств модели. В совокупности с простотой и наглядностью моделей КАС, это открывает огромный потенциал для изучения биосферы и ее экосистем. Кроме того, возникает возможность построения пространственно-временных моделей экосистем и биосферы в целом, создаваемых по реальным наземным и спутниковым данным, а также значительно облегчается сопряжение этих данных.

Как указано выше, отличием моделей КАС является присутствие в них методов адаптивной самоорганизации (сорганизации и конкуренции) сети (сообщества), видов или организмов, отражающих наличие соответствующих процессов в реальных экосистемах и обеспечивающего взаимосогласование экосистемных процессов. В частности, такие методы позволяют обеспечить требуемый уровень замыкания круговоротов вещества и энергии в модели экосистемы и формировать ее множественную устойчивость на основе соответствующего аттрактивного ландшафта (множества стационарных состояний, возникающих в ответ на определенные внешние условия).

Другой математический термин для аттрактора – инвариантное многообразие. Аттрактивный ландшафт представляет собой взаимосвязанное сообщество таких инвариантных многообразий и индивидуален для конкретной экосистемы, а также для биосферы в целом (и их моделей в КАС). Он отражает инвариантные свойства экосистемы при различных изменениях (трансформациях) внешних условий. То есть является ее индивидуальным портретом на фоне предлагаемой общности подхода к описанию экосистем так же, как представитель определенного вида обладает присущими лишь ему индивидуальными особенностями поведения. При необходимости реакции на новые условия он изменяется, но, в целом, сохраняет свои свойства. Например, на сплошных вырубках аттрактивный ландшафт формируется на основе формирования связей (взаимозависимостей) между видами в процессе формирования древостоя и устойчив для зрелого леса.

С ростом сложности моделей КАС (числа уравнений и связей – аналог биоразнообразия) растут богатство возможностей и устойчивость (усложняется аттрактивный ландшафт), что отличает их от классических редукционистских моделей и роднит с реальными экосистемами. Это прямое следствие использования в моделях фундаментальных принципов организации биосферы и ее экосистем.

Отметим, что в настоящий момент известно, что экосистемы обладают множеством стационарных состояний. Однако, в целом рассмотренная картина является одним из предсказаний КАС (на основе свойств ее математических моделей), ожидающим экспериментального подтверждения. Такие предсказания являются необходимым условием любой добротной теории и предлагают перспективы для дальнейших исследований.

В экспериментах с рассматриваемыми сетевыми моделями наблюдались также сценарии перехода от порядка к хаосу, возникающие при нарушении условий стационарности модели экосистемы. В результате возникающей при этом самоорганизации или адаптивной самоорганизации возникают сценарии перехода от хаоса к порядку, если это позволяют условия моделирования. Это еще один важный аспект для изучения границ устойчивости биосферы и ее экосистем. Однако полученные результаты требуют более глубоких исследований, включающих изучение возникающих фрактальных свойств.

Одно из отличий, развиваемых в КАС методов от классических методов идентификации, заключается в высокой универсальности первых. Они предназначены для адаптивной самоорганизации моделей экосистем и биосферы прямо в процессе их функционирования для коррекции динамических режимов. Пример такой модели мы приведем в следующей публикации. Так, например, может быть получена модель сукцессии на определенном участке леса, учитывающая изменение условий произрастания древостоя. Или модель роста дерева с учетом внешних деструктивных воздействий, или изменений внешних условий. С другой стороны, они могут использоваться и как универсальные методы идентификации.

Заключение

Таким образом, Концепция Адаптивной Самоорганизации обобщает фундаментальные свойства сложных природных систем. Ее модели, базирующиеся на новейших открытиях ряда современных наук, ориентированы на изменение статуса биосферы и ее экосистем с уникального на закономерный на основе общности фундаментальных свойств разнородных природных систем. Эта общность свойств позволяет компенсировать невозможность проверки воспроизводимости экспериментов на единичных объектах планетарного или континентального масштаба. Предлагаемая методология моделирования позволяет сделать биосферу и ее экосистемы законными объектами науки на основе множественности их высоко реалистичных моделей и выйти на разрешение проблемы глобального кризиса биосферы.

В следующей публикации мы приведем примеры построения экологических моделей на основе рассмотренной здесь Концепции Адаптивной Самоорганизации.

Литература

1. Барцев С.И., Барцева О.Д. Эвристические нейросетевые модели в биофизике: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет; Институт цветных металлов и золота, 2007. 92 с.
2. Горбань А.Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // Сибирский журнал вычислительной математики. 1998. **1**, № 1. С. 11-24.
3. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. Т.1. 350 с.; Т.2. 285 с.
4. Дойч Д. Структура реальности: Пер. с англ. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. 400 с.
5. Иванова Н.С. Модель восстановительно-возрастной динамики лесов Зауральской холмисто-предгорной провинции / Н.С. Иванова, Г.П. Быстрай, С.А. Охотников, Е.С. Золотова // Современные проблемы науки и образования. 2011, № 4; URL: http://www.science-education.ru/98-4754 (дата обращения: 05.10.2011).
6. Кроновер Ричард М. Фракталы и хаос в динамических системах: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2006. 488 с.

7. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006. 240 с.
8. Ланкин Ю.П., Иванова Н.С. Общий подход к моделированию разнообразия экосистем биосферы на основе фундаментальных свойств живых систем // Современные проблемы науки и образования. 2011, № 6; URL: http://www.science-education.ru/100-4883 (дата обращения: 09.11.2011).
9. Ланкин Ю.П., Хлебопрос Р.Г. Экологические основания концепции самоадаптирующихся сетей и систем с поисковым поведением // Инженерная экология. 2001. № 2. С. 2-26.
10. Ланкин Ю.П. Моделирование экологической сложности на основе самоорганизующихся адаптивных сетей // Материалы Национальной конференции с международным участием "Математическое моделирование в экологии" ЭкоМатМод-2009. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2009. С. 153-154.
11. Ланкин Ю.П., Басканова Т.Ф. Методы для моделей адаптивной самоорганизации экосистем // Материалы второй Национальной конференции с международным участием "Математическое моделирование в экологии" ЭкоМатМод-2011. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2011. С. 147-149.
12. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы: Пер. с англ. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
13. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой: Пер. с англ. М.: Эдиториал УРСС, 2001. 312 с.
14. Суховольский В.Г. Моделирование экологических систем: проблемы и возможные решения // Материалы второй Национальной конференции с международным участием "Математическое моделирование в экологии" ЭкоМатМод-2011. Пущино: ИФХиБПП РАН, 2011. С. 259-261.
15. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: Пер с англ. М.: Издат. дом "Вильямс", 2006. 1104 с.
16. Хакен Г. Синергетика: Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 404 с.
17. Чайковский Ю.В. Активный связный мир. Опыт теории эволюции жизни. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2008. 726 с.
18. Lankin J.P., Baskanova T.F. Algorithms of self-adaptation for atmospheric model designing // SPIE. 2004. V. 5397. P. 260-270.

Рецензенты:

Мысливец С.Г., д.ф.-м.н., профессор, заведующая кафедрой высшей математики 1, СФУ, г. Красноярск.

Менщиков С.Л., д.с.-х.н., заведующий отделом лесоведения, Ботанический сад УрО РАН, г. Екатеринбург.