



О ВОЗМОЖНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ РАЗВИТИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЭКОЛОГИИ

Н. В. Белотелов

Вычислительный Центр им. А. А. Дородницына, ФИЦ ИУ РАН
Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40
E-mail: belotel@mail.ru

ON POSSIBLE DIRECTIONS OF DEVELOPING MATHEMATICAL ECOLOGY

N. V. Belotelov

IC IM CC RAS A. A. Dorodnicyn,
40 Vavilova str., Moscow, Russia
E-mail: belotel@mail.ru

Аннотация. Обсуждается роль математического моделирования для развития понимания экологических систем различного пространственно-временного масштаба. Приводятся высказывания крупнейших физиков XX в. о месте математики в развитии представлений о неживой материи. Обсуждается проблема совместного использования при моделировании экосистем популяционного и масс-энергетического подходов. На примере трех задач – моделирование динамики растительности при изменении климата; моделирование связи между численностью вида и метаболизмом особи; моделирование подвижности популяции – обсуждается проблема математического описания экологических объектов. Центральными являются вопросы: достаточно ли для описания экологических систем типичных переменных – численности популяций и концентрации биогенных элементов, а также возможно ли их совместное одновременное измерение. Высказывается мнение о том, что при исследовании экологических систем необходимо заимствовать методологические разработки современной физики, но при этом системно и тщательно согласовывать системы понятий, используемых для экологических исследований с физико-математическими системами понятий.

Ключевые слова: популяционные модели, модели круговорота биогенных элементов, принцип соответствия, миграция особей.

Abstract. The problem of joint use of population and mass energy approaches in modeling ecosystems is discussed. On the example of three problems: modeling of vegetation dynamics under climate change; modeling of connection between species number and individual metabolism; modeling of population mobility, the problem of mathematical description of ecological objects is discussed. The central questions are whether typical variables – population size and nutrient concentrations – are sufficient to describe ecological systems, and whether they can be measured together simultaneously. The opinion is expressed that in the study of ecological systems it is necessary to borrow methodological developments of modern physics, but at the same time systematically and carefully coordinate the systems of concepts used for environmental studies with physical and mathematical systems of concepts.

Key words: population models, nutrient cycling models, matching principle, migration of individuals.

Задачей науки является увеличение и упорядочивание нашего опыта.
Н. Бор

Душки они [математики] в, так сказать, прирученном состоянии
Н. В. Тимофеев-Ресовский

Введение

Последний эпиграф к статье взят из лекции Тимофеева-Ресовского 1967 г., в которой он, в частности, обсуждает место и роль математики в изучении биосферных процессов. В этой лекции он ставит две задачи: первая – это выделе-

ние важнейших факторов, определяющих эволюционную динамику биогеоценозов, и вторая, которая связана с созданием, говоря современным языком, виртуальных компьютерных моделей биогеоценозов, позволяющих проводить машинные эксперименты, изменяя те или иные значения параметров, влияющих на их динамику.

С той поры прошло более полувека – срок, позволяющий подводить некоторые итоги и определять ориентиры будущего движения.

Антропогенная трансформация наземных и водных экосистем за прошедшее время существенно усилилась. Сейчас актуальной задачей становится поиск путей восстановления нарушенной окружающей среды, и в связи с этим важной представляется разработка математических моделей, позволяющих прогнозировать развитие нарушений и исследовать эффективность восстановительных мероприятий. За прошедшее время вычислительные возможности электронно-вычислительных машин (ЭВМ) неслыханно возросли. Создано огромное количество моделей биосистем различного уровня, появилось целое научное направление – математическая экология. И тем не менее неудовлетворенность совместной деятельностью биологов и математиков имеет место. Биологи берут от математики в основном средства для обработки натуральных данных. Математические модели, как правило, используются в качестве иллюстративного материала, который позволяет показать те или иные возможности математического аппарата, используемого при построении модели. За прошедший период не удалось на основании математической формализации эмпирических представлений биологов создать стройную систему взглядов на взаимосвязь различных элементов, формирующих динамику биогеоценозов. В статье делается попытка обсудить эти вопросы.

Основным вопросом, связанным с развитием науки, является создание и развитие понятийного аппарата, т.е. системы понятий, с помощью которых объективно, в идеале без влияния внутреннего состояния наблюдателя, описываются эти самые явления и процессы и устанавливаются причинно-следственные связи между понятиями.

«Каждый естествоиспытатель постоянно сталкивается с проблемой объективного описания опыта; под этим мы подразумеваем однозначный отчет или словесное сообщение. Всякое новое знание является нам в оболочке старых понятий, приспособленной для объяснения прежнего опыта, и всякая такая оболочка может оказаться слишком узкой для того, чтобы включить в себя новый опыт. Расширение системы понятий не только восстанавливает порядок внутри соответствующей области знаний, но и раскрывает аналогии в других областях.

...Когда мы говорим о системе понятий, мы имеем в виду просто-напросто однозначное логическое отображение соотношения между

опытными данными... Математика, так решительно содействовавшая развитию логического мышления, играет особую роль; своими четко определенными абстракциями она оказывает неоценимую помощь при выражении стройных логических зависимостей... Мы будем считать ее (чистую математику) скорее усовершенствованием общего языка для отображения таких зависимостей, для которых обычное словесное выражение оказалось бы неточным или слишком сложным. В связи с этим можно подчеркнуть, что необходимая для объективного описания однозначность определений достигается при употреблении математических символов именно благодаря тому, что таким способом избегаются ссылки на сознательный субъект, которыми пронизан повседневный язык» [1].

Этап математизации экологии, как и других описательных наук, начался в середине XX в., когда развитие системы понятий о неживой материи – физики – ошеломило научную общественность. Физики в течение жизни одного поколения не просто доказали, что есть атом (Э. Мах признал существование молекул в 1910 г. [2]), но и расщепили его. Другим фактором стремительного проникновения математических методов в описательные науки явилось появление и развитие ЭВМ.

Именно в тот момент, когда ЭВМ – машины третьего поколения – стали «входить в массы», возник бурный интерес к математическому моделированию в экологии, экономике, социологии и в других дисциплинах, которые можно отнести к гуманитарным наукам. И именно к этому моменту относятся слова Тимофеева-Ресовского, вынесенные в эпиграф.

Проблема измерений и математическое моделирование

Естественнонаучные знания опираются на следующие положения: 1) известное триединство: эксперимент (опыт), теория, практика (повторение опыта). «Наблюдение, размышление и опыт – вот что составляет так называемый научный метод» [3]; 2) логическая дедукция вывода понятий и утверждений. «Цель теоретической физики состоит в том, чтобы создать систему понятий, основанную на возможно меньшем числе логически независимых гипотез, которая позволила бы установить причинную взаимосвязь всего комплекса физических процессов» [4]. Важнейшей характеристикой является количественная измеримость вводимых понятий, их численная объективация.

Проблема измеримости является той гранью, разделяющей естественнонаучный метод

и гуманитарные подходы, которая выстраивает системы понятий и утверждений, связывающие эти понятия, но не предлагает системного подхода к оценке используемых понятий, тогда как в физике система единиц измерения (СИ, СГСЭ и др.) является важнейшей частью системы физических моделей. Условное «отделение» «естественнонаучной» области знаний от «гуманитарной» прежде всего связано с пространственно-временными характеристиками изучаемых процессов и явлений, поскольку масштабы объектов, изучаемых гуманитарными областями знаний, не позволяют проведение эксперимента.

В XX в. в физике произошли радикальные революционные изменения, которые в настоящее время только начинают осознаваться широкой научной гуманитарной общественностью. Это принцип дополнительности (принцип неопределенности Гейзенберга), принцип соответствия, разрешение корпускулярно-волнового парадокса введением понятия волны Де Бройля и ряд других положений. Парадоксальность и «контринтуитивность» этих положений с доминирующими в начале XX в. представлениями классической физики доказали свою жизнеспособность в результате экспериментальной, теоретической и практической проверки этих положений в естественнонаучной области явлений. Главное, что позволило совершить такой революционный прорыв, заключалось в возможности многократной экспериментальной проверки положений теории за время жизни наблюдателя. Это позволило создать научную базу революционных технологических новаций. В настоящее время человечество намного лучше понимает закономерности в неживой материи, но, к сожалению, намного хуже осознает закономерности в Природе и Обществе.

Если мы изучаем системы, имеющие пространственно-временные масштабы, много меньшие масштабов наблюдателя, т.е. человека, то вышеизложенный подход показывает чрезвычайную эффективность, а вот если нет? В этом случае одним из способов познания сложных систем является создание их математических моделей, которые, к сожалению, не поддаются «устойчивой» экспериментальной проверке. Математические модели сложных систем в большинстве случаев являются символами веры или отображением балансовых причинно-следственных связей, понимаемых нами и выделяемых в изучаемой системе. Под моделью мы подразумеваем формальное представление взаимосвязей между измеримыми понятиями.

По существу, построение моделей – это желание найти казуальности в окружающем нас мире, научиться измерять и предсказывать процессы окружающей жизни. Наблюдатель оперирует, с одной стороны, «научными» категориями (принципами, моделями, методами). С другой стороны, он оперирует языковыми представлениями, сложившимися при феноменологическом изучении таких областей реальной жизни, как экология, этология или социология и экономика. Наблюдатель организует взаимную трансляцию этих представлений друг в друга.

Математическое моделирование в любой науке – это процесс, в котором можно выделить следующие этапы:

- 1) постановка проблемы (задачи), которая формулируется на языке предметной области;
- 2) математическая формализация взаимосвязей между измеримыми понятиями;
- 3) попытка исследования полученной формализации математическими методами, что редко удается при формализации экологических проблем;
- 4) создание программы для ЭВМ и проведение вычислительных экспериментов;
- 5) интерпретация результатов математического исследования и вычислений в связи с исходной проблемой (заметим, что вычислительный эксперимент часто не доказывает, а лишь иллюстрирует).

Целями создания экологических моделей являются:

- 1) объяснение наблюдаемых эффектов (колебания численности, популяционные волны и т.п.);
- 2) прогнозирование состояния экосистем;
- 3) формализация имеющихся представлений (инструмент междисциплинарных исследований).

В последнем случае модели позволяют по-новому взглянуть на изучаемые экологические объекты. На их основе создаются системы понятий, в которых обсуждаются исследуемые явления.

Классическим примером первого типа модели является модель Лотки – Вольтерры «хищник-жертва» [5], которая показала, что причиной колебания численности популяции могут являться межпопуляционные взаимодействия. Для этого используется аппарат дифференциальных уравнений, который предполагает дифференцируемость функции численности от времени, что есть сильное огрубление реальной ситуации. Тем не менее эта модель породила огромный поток математических моделей различных биосистем, но в реальной экспериментальной экологии эти модели практически не используются.

Примером второго типа являются многочисленные имитационные модели, например, гэм-модели лесной растительности или модели круговорота углерода в биосфере, которые, как показывает анализ их использования, являются по существу не прогностическими, а лишь иллюстративными [6, 7].

Для иллюстрации роли математической модели при возникновении новой системы понятий для описания определенных явлений мы приведем пример из физики, а именно «возникновение» понятия электромагнитного поля. В III томе «Курса общей физики» Д. В. Сивухина [8] читаем:

«Яркую характеристику воззрениям Фарадея дал Генрих Герц в докладе, прочитанном в Гедельберге в 1889 г. "Фарадей считал, что электричество существует наверное, но что о его силах спорят. Он видел, однако, насколько осязательно выступают эти силы, в то время как самого электричества он не мог никак обнаружить. И тогда все обернулось в его представлениях. Электрические и магнитные силы стали для него существующими, действительными, осязаемыми, а электричество, магнетизм сделались вещами, о существовании которых можно спорить. Силовые линии, как он называл силы, мыслимые самостоятельно, стояли перед его умственным взором в пространстве как состояния последнего, как напряжения, как вихри, как течения, как многое другое, что и сам он не мог определить, но они стояли там, действуя друг на друга, сдвигая и толкая тела туда и сюда, распространяясь и сообщая друг через друга возбуждения от точки к точке".

Фарадей никогда не пользовался языком математических формул. Рассуждения и доказательства Фарадея воспринимались с трудом и даже отвергались его современниками. Зато среди убежденных приверженцев Фарадея был гениальный Максвелл, в совершенстве владевший математическими методами своего времени. Он облек основные идеи Фарадея в математическую форму. Он обобщил опытные факты и пополнил их новыми. Таким путем в 60-е гг. XIX в. ему удалось сформулировать систему уравнений, в которой в сжатой и точной форме содержатся все количественные законы электромагнитного поля».

То есть полевое описание электромагнитных явлений возникло в каком-то смысле в результате создания математической модели. «Цель математической физики заключается не только в том, чтобы облегчить физику вычисление некоторых постоянных или интегрирование дифференциальных уравнений. Она состоит еще и в том, чтобы знакомить физика со скрытой

гармонией вещей, показывая их ему под новым углом зрения» [9].

К сожалению, математическая экология не доросла до такого состояния. Далее мы рассмотрим несколько примеров моделей, которые либо ставят вопросы «Что означает данное понятие?», «Те ли понятия мы измеряем?», либо ведут к пониманию, что для изучения экологического объекта необходимо рассматривать неожиданную физическую аналогию. Центральными являются вопросы – достаточно ли для описания экологических систем типичных переменных: численность популяций, число видов, концентрация биогенных элементов и др., а также возможно ли их одновременное совместное измерение.

Примеры экологических проблем и их математическое исследование

В экологии можно выделить два подхода к описанию экосистем.

Первый – масс-энергетический – связан с представлением о круговороте биогенных элементов, который организуют живые системы, взаимодействующие с абиотическим окружением, используя энергию Солнца.

Второй – популяционный: основными переменными, используемыми при этом описании, являются концентрации или численности популяций.

Масс-энергетическое описание возникло вследствие развития геохимии, что позволило в начале XX в. осознать, что живые системы, взаимодействуя друг с другом и окружающими абиотическими факторами, организуют круговороты биогенных элементов и являются важнейшим фактором геохимической эволюции Земли. На основании этого взгляда на функционирование экологических систем появились такие базовые понятия, как трофические цепи, продуктивность и другие, описание которых в рамках математических моделей и в настоящее время является основой для описания и прогноза поведения экологических объектов. Пионером развития математических моделей такого типа является В. А. Костицын [10].

Как правило, в этих математических моделях выделяют переменные, описывающие продукционные процессы, потоки биогенных элементов, процессы синтеза и деструкции органического вещества. Для описания динамики переменных широко используют аппарат либо обыкновенных дифференциальных уравнений, либо разностных уравнений, которые привязываются к пространственной сетке (если модель учитывает пространственную компо-

ненту). Примером такого типа моделей может являться модель круговорота углерода на суше, которая в различных модификациях используется в качестве подблока в глобальных моделях для оценки изменения климата.

Другим способом описания экологических объектов является популяционное описание. В основе популяционного подхода лежит свойство живых систем образовывать популяции, состоящие из особей, обитающих в определенном ареале и производящих другие особи. Такое описание живых систем лежит в основе широкого класса математических моделей, родоначальниками которого являются В. Вольтерра и А. Лотка [5, 11, 12]. Это так называемые вольтерровские модели.

Важной особенностью современного этапа развития теории и практики математического моделирования в экологии является осознание того факта, что математические модели сложных систем, построенные на основании интегрирования большого количества уравнений и переменных, не приводят к ожидаемым удовлетворительным результатам прогнозирования. Поэтому актуальной задачей математического моделирования в экологии является разработка и построение иерархии взаимосвязанных моделей.

Другая проблема использования математических моделей экологических систем заключается в том, что точность экологического прогнозирования существенным образом зависит от возможности корректной идентификации модели. А точность экологических параметров, с которой они измеряются на практике, оставляет желать лучшего.

Современные подходы к моделированию экологических объектов исходят из предположения, что все рассматриваемые фазовые переменные и параметры могут быть в принципе одновременно измерены. В этом модельеры следуют традиции классической физики, «предполагая, что всегда можно "подсмотреть" явление, не вмешиваясь в него и не влияя на него... Пренебрежение этим обстоятельством представляет собой абстракцию, которую можно назвать абсолютизацией физического процесса. Если ее принять, то становится возможным рассмотрение физических процессов как происходящих самих по себе, вне зависимости от того, существует ли принципиальная возможность их наблюдения» [13].

Далее мы обсудим три задачи, на примере которых постараемся показать невозможность одновременного измерения некоторых экологических переменных.

Моделирование изменения растительности при изменении климата

Считается, что при изменении климата в первую очередь изменятся продукционные процессы и процессы деструкции, что приведет к изменению в динамике биогенных элементов, и прежде всего углерода.

Модели, описывающие круговороты биогенных элементов, являются динамическими балансовыми структурами блочного типа. Это связано с тем, что существование многих реальных процессов заключается в накоплении и расходовании вещества и энергии в отдельных естественно выделяемых компартментах и их перетоках из одного компартмента в другой. Также блочная структура моделей связана с необходимостью описания взаимодействия процессов различной природы (физических, физико-химических, биологических, экологических) и обладающих самыми различными временными масштабами.

Примерами развитых имитационных моделей могут служить глобальные модели биосферных процессов [7]. Приведем типичную систему уравнений, описывающих круговорот углерода на суше:

$$\begin{aligned}\frac{dC}{dt} &= \sum_{ij} phot_{ij}(p_{ij}, s_{ij}, T_{ij}, w_{ij}) - \sum_{ij} B_{ij}(p_{ij}, T_{ij}, w_{ij}), \\ \frac{dp_{ij}}{dt} &= phot_{ij}(p_{ij}, s_{ij}, T_{ij}, w_{ij}) - fall_{ij}(p_{ij}, T_{ij}, w_{ij}), \\ \frac{ds_{ij}}{dt} &= fall_{ij}(p_{ij}, T_{ij}, w_{ij}) - B_{ij}(p_{ij}, T_{ij}, w_{ij}),\end{aligned}$$

где C – концентрация CO_2 в атмосфере; p_{ij} и s_{ij} – углерод в биомассе растений и почве соответственно в ij -ой пространственной ячейке; функции $phot_{ij}(p_{ij}, s_{ij}, T_{ij}, w_{ij})$, $B_{ij}(p_{ij}, T_{ij}, w_{ij})$, $fall_{ij}(p_{ij}, T_{ij}, w_{ij})$ описывают соответственно фотосинтез, дыхание почвы и опад; T_{ij}, w_{ij} – температура и влажность в ячейке. Отметим, что в них явно нет видového (популяционного) описания. Это затрудняет проведение их верификации и идентификации. Более того, при использовании системы необходимо учитывать точность измерения начальных данных и регрессий, описывающих функциональные зависимости.

В работах [14–16] был предложен биоклиматический динамический подход, в котором для описания связи между климатом и растительностью используют «биоклиматический индекс» или «биоклиматическую схему».

Под биоклиматическим индексом понимается комбинация климатических параметров (например, таких, как радиация, температура, осадки и др.), с которыми сопоставляется та или иная характеристика растительности. Формальным образом биоклиматический индекс может быть представлен отображением G множества климатических параметров $\{K\}$ на дискретное множество типов растительного покрова $\{B\}$: $G: \{K \rightarrow B\}$.

Биоклиматические схемы характеризуют равновесное распределение растительных биомов в условиях установившегося климата. В реальных же приложениях возникает задача оценки передвижения границ растительных зон в условиях динамически меняющегося климата. В настоящее время прогнозные оценки изменения климата в основном относятся к предсказаниям нового равновесного состояния для удвоенной концентрации CO_2 в атмосфере. При получении таких прогнозов в первую очередь используются два источника: палеоаналоги предполагаемого состояния и модели общей циркуляции атмосферы. Так, в [10] приведены результаты расчетов, соответствующих четырем различным сценариям климатических изменений, полученным на различных «равновесных» сценариях климата. Однако во всех работах такого рода не учитывается, что прогнозируемое время удвоения CO_2 существенно меньше характерных времен трансформации растительных зон. Поэтому остается неясным, к какому моменту относятся результаты прогнозов: если ко времени получения климатического сценария, то растительные зоны не успеют прийти в прогнозируемое равновесное положение. Если же результаты отнести к временам, когда растительные зоны достигнут нового равновесного состояния, то необходимо принять дополнительное предположение о том, что после достижения состояния, определенно сценарием, климат далее не меняется.

Нами была разработана модель [15], в которой на основе биоклиматической схемы решается задача оценки динамики растительных биомов. Предполагая, что в первом приближении характер связи климат – растительность сохраняется и при изменениях климатических параметров, биоклиматическую схему дополнили процедурой, описывающей переход от одного типа растительности к другому. В процедуре учитывалось время, затрачиваемое на переходные процессы между типами, выделенными в нашей агрегации растительности, которые определялись экспертами.

Попытка определения взаимосвязи подходов, а именно геоботанического (биомного) с

продукционным (масс-энергетическим), описанных выше, оказалась неудачной, поскольку потребовался анализ разномасштабной по времени и пространству биологической информации, которой не располагали биологи. Но, по-видимому, такой анализ в классическом плане, предполагающий возможность совместного измерения значений разномасштабных переменных, в принципе невозможен. Совмещение подходов требует неклассического способа описания.

Связь между численностью вида и метаболизмом особи

Рассмотрим другую задачу – определение (моделирование) связи между численностью вида и скоростью метаболизма особи, опираясь на анализ распределения деструкции и продукции по размерам организмов, выполненных в работах В. Г. Горшкова [17, 18].

Устойчивость экологических сообществ может быть охарактеризована минимальностью флуктуаций доступных запасов органических и неорганических веществ. Эти флуктуации возникают вследствие рассогласования во времени процессов синтеза и деструкции, организуемых различными видами (организмами), имеющими различные характерные размеры особей. Возникающие дефициты (рассогласования) могут приводить к разрушению локальных экосистем. Естественно предположить, что в процессе эволюции происходила минимизация таких флуктуаций, и это положение может считаться важным принципом организации локальных экосистем. Исходя из этого положения, в работе [18] показано, что для некоторого вида его численность n , удовлетворяющая вышесказанному принципу, связана со средним размером особи L и средней скоростью метаболизма особи q следующим выражением $n \sim \frac{1}{Lq}$. Об-

судим этот результат с позиции математического моделирования. Полученное соотношение носит статистический характер, причем при получении его авторы не конкретизируют характерное время усреднения. Оно не связано с типами взаимодействия между популяциями и не может претендовать на объяснение таких явлений, как колебания численности или пространственные волны популяций. Тем не менее ясно, что, если мы хотим при моделировании экосистем учитывать как масс-энергетические, так и популяционные процессы, нам надо вводить в качестве модельной характеристики размерный спектр потребления первичной про-

дукции различными популяциями (под размерным спектром потребления $\beta(L)$ понимается доля потребления первичной продукции особями, имеющими характерный размер L), входящими в экосистему. Последнее предполагает введение в модель не только численности видов, но и доли потребляемой первичной продукции.

Миграционные и демографические процессы

Миграции являются частным случаем адаптивного изменения поведения организма при изменившихся условиях сред, в частности, при повышении плотности популяции.

Миграционные процессы характеризуются радиусом индивидуальной активности особей, который представляет собой характерный размер индивидуальной кормовой площадки. Рассмотрим энергетический баланс особи. При этом мы не будем учитывать смертность и рождаемость, а также траты энергии на заботу о потомстве. Метаболическая мощность передвигающегося организма q связана с основным обменом q_0 (метаболизм особи без движения) следующим образом: $q = (A(u) + 1) \cdot q_0$, где u – средняя скорость передвижения особи, $A(u)$ – активность движения [19].

Обозначим через R радиус индивидуальной активности, т.е. характерный линейный размер индивидуальной кормовой территории. Введем характерные времена τ_R – время восстановления ресурса и τ_S – время обхода особью своей кормовой территории. Тогда, оценив площадь кормовой территории особи, используя калорийность ресурса и скорость его восстановления, а также исходя из баланса между потребленным ресурсом, затратами на перемещение и основным метаболизмом особи, в работе [14] было получено соотношение, оценивающее влияние разброса в размерах взрослых особей на разброс в размерах кормовых площадок и средних скоростях перемещения $\theta(L) \cdot L \cdot \delta L = \delta u \cdot \delta R$, где $\theta(L)$ – монотонная функция.

Это соотношение можно трактовать как соотношение неопределенности для популяции. Физический смысл ее заключается в следующем. Разброс в размерах (массах) взрослых особей в пределах одного вида (более того, одной популяции) приводит либо к разбросу в радиусах индивидуальной активности, либо в средних скоростях перемещения по ареалу. Этот разброс тем больше, чем больше размерный класс животного L и вариации размера δL .

Для конкретной особи радиус ее индивидуальной активности или среднюю скорость возможно определить не точнее, чем позволяет приведенное выше соотношение. То есть модели популяционной экологии, фазовыми переменными которых являются численности популяций, принципиально не могут быть «переведены» (описаны) с произвольной точностью в фазовое пространство, переменными в которых являются масса и энергия.

Заключение

Вышеприведенные примеры показывают ограниченность и несистемность наших представлений об окружающей среде. В первом примере при балансовом подходе к моделированию круговорота углерода в биосфере у нас при оценках исчезают такие очевидно важные характеристики, как распределение по поверхности типов растительного покрова. Учет их при использовании биоклиматического подхода невозможен в результате недостаточности наших экспериментальных данных. Более того, по-видимому, учет только углеродного баланса без учета баланса воды на суше и факторов, влияющих на формирование последнего, при моделировании не дает новых знаний в сравнении с обычным балансовым подходом, основанным на учете стока углерода, его депонировании в почве и стволах растений и дыхании. Для уточнения оценок и анализа взаимосвязанности различных факторов необходимо вводить и описывать в математических моделях некоторые новые сущности, учитывающие взаимосвязанность ландшафтных, ценотических параметров биотического покрова, а также потоки влаги.

Второй пример показывает важность при моделировании экосистем учета размерного спектра популяций, формирующих экосистему.

Последний пример показывает, что подвижность особей теснейшим образом связана с продукционными характеристиками местообитания. В моделях популяционной экологии недостаточно рассматривать популяцию как совокупность точечных особей, а возможно имеет смысл заимствовать образ «волновой функции», квадрат которой есть вероятность нахождения частицы – особи в данном месте.

Из этого можно сделать вывод, что возможно целесообразно при описании живых систем заимствовать «математические образы», возникшие в процессе описания микрофизических объектов, например, подобие волновой функции. Поскольку, как было показано выше, принципиальные совместные измерения обще-

принятых в настоящее время базовых экологических переменных (численность, концентрации биогенных элементов) ограничены.

«Всякая экспериментальная установка, которая позволила бы контролировать такие (биологические) отправления с той же степенью точности, какая требуется для четкого их описания на языке физики, будет препятствовать свободному течению жизни» [20].

Подводя некоторый итог, можно утверждать следующее. Поскольку математические модели являются следствием физико-математической методологии описания неживой природы, то при создании систем моделей, описывающих разно-масштабные процессы в живой и неживой природе, необходимо руководствоваться «принципом соответствия», который был сформулирован при создании квантово-механической теории.

«Наука для своих нужд должна создавать свой собственный язык, свои собственные понятия. Научные понятия часто начинаются с понятий, употребляемых в обычном языке повседневной жизни, но они развиваются совершенно иначе. Обобщение понятий — процесс, часто применяемый в науке. Однако при всяком обобщении должно быть строго удовлетворено одно требование: любое обобщенное понятие должно сводиться к первоначальному, когда выполнены первоначальные условия. Это положение составляет суть принципа соответствия» [4].

Ход мыслей, развитый в одной ветви науки, часто может быть применен к описанию явлений, с виду совершенно отличных. Естественнонаучные представления за последние триста лет породили стремительно развивающийся естественнонаучный язык физико-математического описания природы. В основе такого стремительного развития, безусловно, лежала возможность эксперимента. Гуманитарные представления в XX в. начали активно использовать аналогии естественнонаучного метода, что прежде всего видно в развитии использования методов математического моделирования. Но базовыми конструкциями всех научных гуманитарных дисциплин являются естественные языки, в рамках которых формулируются научные концепции и представления.

Как было отмечено выше, человечество в настоящее время переживает самый сложный кризисный период. По-видимому, основная сложность заключается в непонимании происходящего. Оно связано прежде всего с тем, что такой ситуации в истории не было, следовательно, она не «описана» в понятиях существующих естественных языков.

Процесс эволюции естественных языков плохо изучен, но можно сказать уверенно, что

характерная «скорость эволюции» языка не меньше, чем поколение. При увеличении интенсивности воздействия человечества на биосферу, что является следствием все увеличивающегося энергопотребления, скорость изменений в окружающем мире существенно возрастает. Отсюда, по-видимому, и следует современное непонимание, которое выражается в возникновении новых терминов и научных направлений. Понятия, описывающие наблюдаемые ситуации, не успевают сформироваться и закрепиться в естественном языке. «Мы слишком много знаем, но слишком мало понимаем» [4]. Эту тенденцию заметил создатель кибернетики Н. Винер [21]. Он писал: «После Лейбница, быть может, уже не было человека, который бы полностью обнимал всю интеллектуальную жизнь своего поколения. С той поры наука становится все более делом специалистов, области компетенции которых обнаруживают тенденцию ко все большему сужению... В настоящее же время лишь немногие ученые могут назвать себя или математиками, или физиками, или биологами, не прибавляя к этому дальнейшие ограничения. Ученый становится теперь топологом, или акустиком, или специалистом по жесткокрылым. Он набит жаргоном своей специальной дисциплины и знает всю литературу по ней и все её подразделы. Но всякий вопрос, сколько-нибудь выходящий за эти узкие пределы, такой ученый чаще всего будет рассматривать как нечто, относящееся к коллеге, который работает через три комнаты по коридору... Специализация дисциплин все время возрастает и захватывает все новые области... Пограничные области науки открывают перед надлежаще подготовленным исследователем богатейшие возможности. Но изучение таких областей представляет и наибольшие трудности для обычного метода массового наступления с разделением труда».

Более того, современные информационные технологии – статистическая обработка данных (*big data*), нейросети, *deep learning* и другие – позволяют эффективно обрабатывать, визуализировать, анализировать (если ясно для чего) огромные массивы информации, но при этом не позволяют улучшать наше понимание изучаемых явлений. «Мы видим то, что понимаем» [4], т.е. мы собираем данные, исходя из некоторых теоретических представлений, которые исторически сформировали наше современное понимание мира. Безусловно, это важное направление научной деятельности, но приведет ли оно к улучшению нашего понимания ведущих процессов, формирующих динамику изучаемой системы – не очевидно.

«Нередко говорят, что надо экспериментировать без всякой идеи. Это невозможно; это не только сделало бы всякий опыт бесплодным, но это значило бы желать невозможного. Всякий носит в себе свое миропредставление, от которого не так-то легко освободиться. Например, мы пользуемся языком, а наш язык пропитан предвзятыми идеями и этого нельзя избежать; притом эти предвзятые идеи неосознанны, и поэтому они в тысячу раз опаснее других» [9].

С другой стороны, человеческая цивилизация находится у опасной черты. Ясно, что задача восстановления антропогенно нарушенной окружающей среды станет наипервейшей в скором времени. Но заниматься восстановлением, не имея под руками более или менее надежного инструмента в виде формализованных представлений – математических моделей биосистем разного пространственно-временного уровня – задача нерешаемая. И вряд ли искусственный интеллект здесь поможет.

И поскольку процесс математического моделирования в экологии вышел из желания «повторить успех физики XX в.», то, по видимому, надо смело заимствовать понятийный аппарат (принцип неопределенности, волновая функция, инварианты движения). «Человек видит Мир через символы, порождаемые его воображением. И мы все время ищем все новые и новые символы для понимания Мира. И сама наука есть не более чем символическое описание Мира. Это особенно хорошо видно на примере развития физики и космогонии. По-

ставщиком новых символов теперь оказалась математика. Парадокс нашей жизни: новые символы теперь порождаются не религиозной мыслью, не поэзией, не изобразительным искусством, а... математикой» [22]. Необходимо взаимопроникновение биологических, физических, математических и информационных представлений с обязательным соблюдением принципа соответствия.

Возвращаясь к эпиграфу к данной статье, хотелось бы его дополнить: не только математики должны быть приручены, но и биологи, в каком-то смысле, по-новому должны взглянуть на понятийный аппарат, используемый при описании экологических процессов. Необходим критический анализ понятий, используемых при описании причинно-следственных взаимосвязей в экологии прежде всего с точки зрения процедур измерения в процессе экспериментальной работы. Это, как кажется, есть необходимое условие, которое, хочется надеяться, в перспективе позволит сделать математическую экологию действительно предсказательной наукой, в каком-то смысле похожей на стройную структуру математической физики.

«...Внедрить новые понятия в девственный ум ребенка, – значит в то же самое время размышлять о том, каким образом эти понятия были приобретены нашими предками: значит, следовательно, размышлять об их истинном происхождении, а это, по существу, значит размышлять об их истинной природе» [9].

Библиографический список

1. Бор, Н. Единство знаний / Н. Бор // Избранные научные труды. – М. : Наука, 1971. – Т. II. – С. 481–497.
2. Уиттекер, Э. История теорий эфира и электричества / Э. Уиттекер. – М. ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. – С. 464.
3. Фейнман, Р. Лекции по физике / Р. Фейнман. – М. : Мир, 1977. – Т. 1, 2. – С. 439.
4. Эйнштейн, А. Мир и физика / А. Эйнштейн. – М. : Тайдек и Ко, 2003. – С. 278.
5. Вольтерра, В. Математическая теория борьбы за существование / В. Вольтерра. – М. : Наука, 1976. – 286 с.
6. Smith, T. M. Modeling the Potential Response of Vegetation to Global Climate Change / T. M. Smith, H. H. Shugart, G. B. Bonan, J. B. Smith // Adv. Ecol. Res. – 1992. – Vol. 22. – P. 93–116.
7. Моисеев, Н. Н. Человек и биосфера / Н. Н. Моисеев, В. В. Александров, А. М. Тарко. – М. : Наука, 1985. – 270 с.
8. Сивухин, Д. В. Курс общей физики / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1977. – С. 687.
9. Пуанкаре, А. Наука и гипотеза о науке / А. Пуанкаре. – М. : Наука, 1983. – С. 559.
10. Костицын, В. А. Эволюция атмосферы, биосферы и климата / В. А. Костицын. – М. : Наука, 1984. – 96 с.
11. Алексеев, В. В. Физическое и математическое моделирование экосистем / В. В. Алексеев, И. И. Крышев, Т. Г. Сазыкина. – СПб. : Гидрометеиздат, 1992. – 366 с.
12. Свирежев, Ю. М. Устойчивость биологических сообществ / Ю. М. Свирежев, Д. О. Логофет. – М. : Наука, 1978. – 352 с.
13. Фок, В. А. Начала квантовой механики / В. А. Фок. – М. : Изд-во ЛКИ, 2007. – 375 с.
14. Belotelov, N. V. Bioclimatic Indices Used to Estimate Vegetation Pattern Transformation / N. V. Belotelov, V. G. Bogatyrev, A. P. Kirilenko, S. V. Venevsky // STEP Inter. – 1993. – Vol. 3(3), № 13. – P. 251–253.
15. Кириленко, А. П. Моделирование сдвига растительных зон с учетом климатической нестабильности / А. П. Кириленко, Н. В. Белотелов, Б. Г. Богатырев // ДАН РАН. – 1994. – № 338 (1). – С. 116–118.
16. Belotelov, N. V. Modeling of Time-Dependent Biome Shifts Under Global Climate Changes / N. V. Belotelov, V. G. Bogatyrev, A. P. Kirilenko, S. V. Venevsky // Ecological Modelling. – 1996. – Vol. 87. – P. 29–40.

17. Горшков, В. Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни / В. Г. Горшков. – М. : ВИНТИ, 1995.
18. Makrieva, A. M. Body size, energy consumption and allometric scaling: a new dimension in the diversity-stability debate / A. M. Makrieva, V. G. Gorshkov, Li. Bai-Lian // *Ecological Complexity*. – 2004. – Vol. 1. – P. 139–175.
19. Белотелов, Н. В. Популяционные модели с нелинейной диффузией / Н. В. Белотелов, А. И. Лобанов // *Математическое моделирование*. – 1997. – Т. 9, № 12. – С. 44–56.
20. Бор, Н. Атомы и человеческое познание / Н. Бор // *Избранные научные труды*. – М. : Наука, 1971. – Т. II. – С. 504–514.
21. Винер, Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине / Н. Винер. – М. : Наука, 1983. – С. 344.
22. Налимов, В. В. Спонтанность сознания. Вероятностная теория смыслов и смысловая архитектура личности / В. В. Налимов. – М. : Прометей, 1989.

References

1. Bor N. *Izbrannye nauchnye Trudy* [Selected articles]. Moscow: Nauka, 1971, vol. II, pp. 481–497.
2. Uitteker E. *Istoriya teorii efira i elektrichestva* [History of ether theory and electricity]. Moscow; Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2004, p. 464.
3. Feynman R. *Lektsii po fizike* [Lectures of physics]. Moscow: Mir, 1977, vol. 1, 2, p. 439.
4. Eynshteyn A. *Mir i fizika* [The world and physics]. Moscow: Taydek i Ko, 2003, p. 278.
5. Vol'terra V. *Matematicheskaya teoriya bor'by za sushchestvovanie* [Mathematical theory on struggle for existence]. Moscow: Nauka, 1976, 286 p.
6. Smith T. M., Shugart H. H., Bonan G. B., Smith J. B. *Adv. Ecol. Res.* 1992, vol. 22, pp. 93–116.
7. Moiseev N. N., Aleksandrov V. V., Tarko A. M. *Chelovek i biosfera* [Man and biosphere]. Moscow: Nauka, 1985, 270 p.
8. Sivukhin D. V. *Kurs obshchey fiziki* [Course of general physics]. Moscow: Nauka, 1977, p. 687.
9. Puankare A. *Nauka i gipoteza o nauke* [Science and hypothesis on science]. Moscow: Nauka, 1983, p. 559.
10. Kostitsyn V. A. *Evolyuetsiya atmosfery, biosfery i klimata* [Evolution of atmosphere, biosphere and climate]. Moscow: Nauka, 1984, 96 p.
11. Alekseev V. V., Kryshev I. I., Sazykina T. G. *Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie ekosistem* [Physical and mathematical modelling of ecosystems]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 366 p.
12. Svirezhev Yu. M., Logofet D. O. *Ustoychivost' biologicheskikh soobshchestv* [Sustainability of biological communities]. Moscow: Nauka, 1978, 352 p.
13. Fok V. A. *Nachala kvantovoy mekhaniki* [Foundations of quantum mechanics]. Moscow: Izd-vo LKI, 2007, 375 p.
14. Belotelov N. V., Bogatyrev B. G., Kirilenko A. P., Venevsky S. V. *STEP Inter.* 1993, vol. 3 (3), no. 13, pp. 251–253.
15. Kirilenko A. P., Belotelov N. V., Bogatyrev B. G. *Modelirovanie sdviga rastitel'nykh zon s uchetom klimaticheskoy nestabil'nosti* [Modelling vegetation zones shift considering climatic instability]. DAN RAN. 1994, no. 338 (1), pp. 116–118.
16. Belotelov N. V., Bogatyrev B. G., Kirilenko A. P., Venevsky S. V. *Ecological Modelling*. 1996, vol. 87, pp. 29–40.
17. Gorshkov V. G. *Fizicheskie i biologicheskie osnovy ustoychivosti zhizni* [Physical and biological grounds for life stability]. Moscow: VINITI, 1995.
18. Makrieva A. M., Gorshkov V. G., Bai-Lian Li. *Ecological Complexity*. 2004, vol. 1, pp. 139–175.
19. Belotelov N. V., Lobanov A. I. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modelling]. 1997, vol. 9, no. 12, pp. 44–56.
20. Bor N. *Izbrannye nauchnye trudy* [Selected articles]. Moscow: Nauka, 1971, vol. II, pp. 504–514.
21. Viner N. *Kibernetika, ili upravlenie i svyaz' v zhivotnom i mashine* [Cybernetics, or control and connection in an animal and a machine]. Moscow: Nauka, 1983, p. 344.
22. Nalimov V. V. *Spontannost' soznaniya. Veroyatnostnaya teoriya smyslov i smyslovaya arkhitektonika lichnosti* [Consciousness spontaneity. Probabilistic meaning theory and conceptual personality architectonics]. Moscow: Prometey, 1989.

Белотелов, Н. В.

О возможных направлениях развития математической экологии / Н. В. Белотелов // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. – 2018. – Vol. 3 (4). DOI 10.21685/2500-0578-2018-4-1.