

## ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНОГО РЕДАКТОРА НОМЕРА

### Лесное экологическое моделирование: текущее состояние и перспективы. Откуда могут появиться новые идеи?

DOI: 10.15372/SJFS20150301

Настоящий номер «Сибирского лесного журнала» посвящен проблемам экологического моделирования лесных систем. Математическая экология как отдельная научная дисциплина ведет свое начало с работ А. Лотки и В. Вольтерра (Вольтерра, 2004). Однако кинетические модели популяционной динамики, в которой динамика каждой популяции в многовидовом сообществе описывается отдельным уравнением, изначально страдали двумя крупными недостатками. Во-первых, получить точные решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, начиная уже с системы из четырех уравнений, сложно, и вместо многовидовой экосистемы приходится ограничиваться моделированием динамики сообществ из двух-трех взаимодействующих видов, приговаривая при этом, что взаимодействия компонентов изучаемого сообщества с популяциями вне этого сообщества крайне малы. Иногда это на самом деле так, но только иногда... Во-вторых, при химических экспериментах в пробирке или в популяционных экспериментах с колониями бактерий в чашке Петри нет нужды учитывать влияние модифицирующих факторов (прежде всего температуры среды), поскольку всегда можно термостатировать изучаемый объект. В реальных экосистемах влияние модифицирующих факторов учитывать необходимо. Но сделать это, работая в парадигме Лотки–Вольтерра, невозможно. Так, явно некорректно добавлять в уравнения популяционной динамики дополнительный аддитивный член, пропорциональный температуре среды. В гипотетическом уравнении Ферхюльста  $\frac{dx}{dt} = kx(A-x) + bT$  с дополнительным «температурным» членом  $bT$  (где  $T$  – температура среды по Кельвину) при начальном условии  $x = 0$  с учетом аддитивного члена получим  $\frac{dx}{dt} = bt > 0$ , т. е. возникает самозарождение особей в популяции. Второй

вариант учета влияния модифицирующих факторов в моделях популяционной динамики – введение дополнительных уравнений для описания зависимости коэффициентов кинетических уравнений от модифицирующих факторов. В классической системе Лотки–Вольтерра пришлось бы вводить дополнительные нелинейные уравнения, характеризующие зависимость значений коэффициентов уравнений от погодных условий. Это привело бы к тому, что для описания динамики численности системы «хищник – жертва» вместо системы из двух нелинейных дифференциальных уравнений пришлось бы рассматривать систему из десятка уравнений и шансы получить точные решения таких систем были бы минимальными.

Тем не менее возможности «вольтерровской» парадигмы математической экологии не исчерпаны, и это показывают работы Ф. С. Березовской и Г. П. Карева, Е. Я. Фрисмана и соавторов, Л. В. Недорезова, С. И. Барцева и А. А. Почекутова, представленные в данном журнале.

Но почему же нам не хватает для моделирования лесных экосистем парадигмы Лотки–Вольтерра? Сегодня от матэкологов ожидают развития методов оценки устойчивости экосистем при воздействии на них техногенных и антропогенных факторов, разработки методов прогноза влияния климата на структуру и устойчивость экосистем, оценок продуктивности компонентов сложных экосистем в различных условиях, создания моделей потоков веществ в больших сообществах и методов прогнозов критических явлений (вспышек массового размножения насекомых, ветровалов и пожаров) в лесных экосистемах. К сожалению, все эти задачи плохо описываются на основе кинетических моделей и для решения этих проблем нужны новые подходы и методы моделирования.

Что же может стать источником новых подходов в экологическом моделировании и

какие новые идеи представлены в настоящем выпуске?

Можно, пожалуй, говорить о нескольких потенциальных источниках новых методов в экологическом моделировании. Первый из них – классическая экономическая наука. Идеи, использованные в представленной статье О. В. Тарасовой, И. И. Калашниковой и В. В. Кузнецовой, посвященной моделированию потребления корма насекомыми, идут не от Лотки и даже не от Вольтерра, а от экономистов конца XIX в. и от работ середины XX в. нобелевского лауреата по экономике Дж. Хикса (1993). Именно из экономики в эту работу энтомологов «пришли» принцип оптимальности и понятие «цены» корма.

Работы еще одного нобелевского лауреата в области экономики – Роберта Соллоу (Solow, 1956) послужили катализатором (я это знаю точно), способствовавшим построению представленной в настоящем номере экономико-экологической модели роста лесных насаждений (статья В. Г. Суховольского, Ю. Д. Ивановой).

Из экономической науки пришла в экологическое моделирование и задача выбора оптимальной стратегии поведения особей по критерию «затраты/эффективность». Примером такого подхода является включенная в номер статья А. В. Ковалева и П. Е. Волковой, посвященная моделированию поиска самок самцом лесных насекомых с использованием системы феромонной коммуникации. Подобный подход хорошо стыкуется с «экономическим»: легко поверить в то, что насекомые в процессе поиска (корма, половых партнеров и т. п.) ведут себя весьма разумно и стремятся поскорее и без лишних затрат на полет найти своего полового партнера.

«Точкой роста» в лесном экологическом моделировании будут, по всей видимости, исследования пространственной структуры древостоев. Это направление исследований представлено статьей О. П. Секретенко и П. Я. Грабарника и работой коллектива модельеров из Биробиджана (А. Н. Колобова с соавторами). В течение длительного времени математики «копили» впрок модели точечных процессов (Møller, Waagepetersen, 2007). Однако их применение для описания конкретных лесных насаждений было затруднительным в связи со сложностью и трудоемкостью на-

турных измерений пространственных координат отдельных деревьев. Развитие методов спутниковых дистанционных измерений, появление беспилотных летательных устройств, похоже, позволит в ближайшее время решить проблему измерений координат отдельных деревьев и приведет к появлению потока работ в области анализа пространственного строения насаждений и получению косвенных оценок взаимодействия деревьев на разных этапах существования древостоев.

Все эти методы уже «пришли» в математическую экологию, и скорость появления в печати новых работ в этом направлении будет определяться скоростью, с которой матэкологи начнут штудировать учебники по economics и «переваривать» работы по теории точечных полей.

Но, похоже, не только экономика может стать источником новых идей в экологическом моделировании. Где-то на горизонте уже виднеются перспективы применения для описания экологических процессов методов квантовой теории поля и теории конденсированного состояния.

Как известно, в квантовой физике результат измерений нескольких переменных может зависеть от порядка, в каком производятся эти измерения. Подобное свойство носит название некоммутативности процесса измерений квантовой системы. Но точно такая же проблема некоммутативности может проявиться при воздействии хищников нескольких видов на популяцию жертв. Назовем коммутативными такие виды хищников, результат воздействия которых на популяцию жертв не зависит от порядка, в котором они воздействуют на своих жертв. Условие коммутативности можно выразить формулой

$$\begin{aligned} x_1 &= (1 - F(y, x)) \cdot (1 - G(z, x)) x_0 = \\ &= (1 - G(z, x)) \cdot (1 - F(y, x)) x_0, \end{aligned}$$

где  $x_0$  и  $x_1$  – начальная и конечная плотности популяций вида-жертвы соответственно,  $F(y, x)$  и  $G(z, x)$  – вероятность гибели особей популяции жертв после воздействия хищников видов  $y$  и  $z$ .

Однако у многих видов хищников интенсивность поиска особей из популяции жертв зависит от плотности их популяции. Если эта плотность становится ниже некоторого кри-

тического значения, хищник переключается на поиск другого корма. Но в таком случае конечная плотность популяции жертв будет зависеть от порядка воздействия на нее хищников и воздействие двух видов хищников может быть некоммутативным:

$$x_{11} = (1 - F(y, x)) \cdot (1 - G(z, x))x_0 \neq x_{12} = \\ = (1 - G(z, x)) \cdot (1 - F(y, x))x_0.$$

Еще сложнее описывать результаты воздействия хищников, если порядок их воздействия неизвестен или же несколько видов некоммутативных хищников одновременно воздействуют на популяцию жертв. В квантовой теории поля последовательности «ветвящихся» событий описываются, в частности, с помощью диаграмм Фейнмана (Маттук, 1969; Абрикосов и др., 2006). Как подобную технику расчетов использовать в экологических моделях, пока до конца не ясно, но сама идея представляется перспективной.

Еще один пример экологической системы, который я обычно привожу при обсуждении возможностей использования квантовой теории поля в экологическом моделировании, знают все россияне с детства – это история Колобка – особи-жертвы, счастливо сумевшей избежать гибели от зубов деда, зайца, волка и медведя, но погибшей при встрече с суперхищником – лисой.

Но давайте представим, что в лесу живет не один Колобок, а популяция Колобков и у каждого из этих Колобков – своя индивидуальная траектория встреч с популяциями хищников. Кому-то из этих Колобков повезет, и он сумеет избежать встреч с хищниками, кто-то закончит свою жизнь после первой встречи с хищником, которым оказалась именно лиса, кто-то регулярно будет встречаться только с зайцами и выживет...

Как оценить вероятность выживания популяции Колобков в лесу в зависимости от вида и плотности некоммутативных популяций хищников? Модель Лотки–Вольтерра трудно приспособить для решения такой задачи. Но представляется, что «колобковая» задача очень похожа на задачу описания движения квантовой частицы по различным траекториям (Фейнман, Хиббс, 1968).

Еще один перспективный источник, из которого матэкологи смогут черпать новые идеи

и методы – физика конденсированного состояния. Ситуацию, когда в ходе сукцессионных процессов качественно изменяются видовой состав и пространственная структура древостоев, очень трудно (если вообще возможно) описать с помощью модели Лотки–Вольтерра. Но для описания сукцессионных переходов и качественных изменений в экосистемах возможно использовать методы статистической физики, в частности теории фазовых переходов (Ландау, Лифшиц, 1965). Как фазовые переходы можно рассматривать вспышки массового размножения лесных насекомых, смены древесных пород в ходе сукцессий, высотнопоясность деревьев разных пород в горах (Суховольский и др., 2008, 2014; Исаев и др., 2009, 2014).

Очень близки к идеям, развиваемым в современной физике (теория ренорм-групповых преобразований (Вильсон, Когут, 1975)), и идеи использования для моделирования роста живых организмов теории клеточных автоматов (статья А. С. Комарова с соавторами в настоящем номере).

К сожалению, жанр «колонки редактора» не позволяет углубиться в возможности новых подходов в лесном экологическом моделировании, но представляется, что следует в ближайшем будущем ожидать «взрыва» новых идей и результатов в этой области. Красноярская школа экологического моделирования к подобному «взрыву» давно подготовлена (собственно, ее представители во многом и формируют процесс реализации этого «взрыва»).

Одна из причин этого в том, что один из основателей красноярской школы экомоделирования, ученый, 85-летию которого посвящен данный номер журнала, Р. Г. Хлебопрос – физик и ученик «мэтра» квантовой физики Н. Н. Боголюбова. Еще в начале своей деятельности в области экологического моделирования Р. Г. Хлебопрос использовал подходы к описанию экологических объектов, идущие от методов теоретической физики. И можно надеяться, что возникновение новых методов экологического моделирования будет способствовать не только решению уже сформулированных в лесной экологии задач, но и появлению новых, о которых мы сегодня просто не думаем...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрикосов А. А., Горьков Л. П., Дзялошинский И. Е.* Методы квантовой теории поля в статистической физике. М.: Добросвет, 2006. 512 с.
- Вильсон К., Когут Дж.* Ренормализационная группа и  $\epsilon$ -разложение. М.: Мир, 1975. 270 с.
- Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 288 с.
- Исаев А. С., Суховольский В. Г., Овчинникова Т. М., Бузыкин А. И.* Сукцессии в лесных ценозах: модель фазового перехода второго рода // Журн. общ. биол. 2009. № 6. С. 451–458.
- Исаев А. С., Суховольский В. Г., Овчинникова Т. М., Бабой С. Д.* Принцип универсальности при использовании моделей фазовых переходов второго рода для описания сукцессионных процессов в лесу // Сиб. экол. журн. 2014. Т. 21. № 3. С. 345–354.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Статистическая физика. М.: Наука, 1965. 567 с.
- Маттук Р.* Фейнмановские диаграммы в проблеме многих тел. М.: Мир, 1969. 366 с.
- Суховольский В. Г., Исхаков Т. Р., Тарасова О. В.* Оптимизационные модели межпопуляционных взаимодействий. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 2008. 162 с.
- Суховольский В. Г., Овчинникова Т. М., Бабой С. Д.* Высотно-поясная зональность древесных пород в горных условиях Саян: модель экологических фазовых переходов второго рода // Журн. общ. биол. 2014. Т. 75. № 1. С. 38–47.
- Фейнман Р., Хиббс А.* Квантовая механика и интегралы по траекториям. М.: Мир, 1968. 382 с.
- Хикс Дж. Р.* Стоимость и капитал. М.: Прогресс, 1993. 488 с.
- Møller J., Waagepetersen R. P.* Modern statistics for spatial point processes // Scand. J. Stat. 2007. V. 4. P. 643–684.
- Solow R. M.* A contribution to the theory of economic growth // Quart. J. Economics. 1956. V. 70. N. 1. P. 65–94.

В. Г. Суховольский,  
научный редактор номера