

## Нелинейный мир А. С. Комарова

Вниманию читателя предлагается специальный выпуск журнала «Компьютерные исследования и моделирование», посвященный памяти Александра Сергеевича Комарова (1945–2015) — профессора, доктора биологических наук, заведующего лабораторией моделирования экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН в Пущино. В номере представлены статьи участников конференций «ЭкоМатМод», коллег и учеников Александра Сергеевича, организатора этих конференций, который сумел объединить в неформальное сообщество математиков, занимающихся проблемами экологии, и экологов, использующих математические методы в своих исследованиях, и создать площадку, где экологи и математики могли регулярно встречаться, обмениваться и стимулировать друг друга идеями, где зарождались новые творческие союзы и получали новое дыхание уже сложившиеся группы ученых.

Александр Сергеевич Комаров — выдающийся представитель экологического моделирования, сделавший весомый вклад в развитие этого направления науки. Яркой гранью его таланта было его умение объединять вокруг научных идей ученых разных направлений, создавая коллективы единомышленников, увлеченно работающих над общей проблемой. Эта уникальная особенность Александра Сергеевича базировалась на великолепной научной эрудиции, глубоких знаниях и личных контактах с огромным числом исследователей. Много лет и до самого последнего дня он был заместителем шеф-редактора международного журнала «EcologicalModelling», входил в редколлегии журналов «Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences», «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем», был избран членом правления Европейского общества экологического моделирования (ESEM). Огромной заслугой перед отечественной наукой стала организация им национальных конференций «ЭкоМатМод», которые проводились с 2005 г. (первая конференция была проведена под эгидой ESEM) с периодичностью в два года и привлекали большое число ученых России, ближнего и дальнего зарубежья. Задуманные как продолжение широко известных среди биологов «Ляпуновско-Молчановских школ» 1970–1980-х годов, конференции «ЭкоМатМод», безусловно, стали значимыми научными событиями на карте российской науки. В мае 2015 г. он провел, к сожалению, свою последнюю конференцию...

А. С. Комаров окончил кафедру теории функций и функционального анализа механико-математического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова и пришел работать в Институт агрохимии и почвоведения АН СССР (первоначальное название — ИФХиБПП РАН) в начале 1970-х годов по приглашению основателя института — чл.-корр. АН СССР В. А. Ковды, который считал важным и необходимым внедрение математических методов в почвенные и биосферные исследования. Ядро вновь образованной тогда лаборатории моделирования почвенных процессов составляли Валерий Галицкий, Яков Пачепский, Людмила Пачепская и другие. В те годы молодой научный городок на юге Подмосквья жил в уникальной атмосфере научного



творчества и энтузиазма, «философского» отношения к бытовым трудностям и полного погружения в научные проблемы. В этом «плавильном котле» идей и задач бурно развивающейся биологической науки математики, физики, химии и другие специалисты во взаимодействии с биологами легко находили неисследованные области, и каждый шаг вперед оказывался достижением, на котором отчетный штамп «впервые в мире» появлялся естественно и закономерно.

В Пушкино Александр Сергеевич знакомится с выдающимися представителями московской математической школы: А. М. Молчановым, Э. Э. Шнолем, А. Д. Базыкиным и другими сотрудниками Научно-исследовательского вычислительного центра АН СССР. В это же время Александром Сергеевичем были пройдены и «биологические университеты» под влиянием таких классиков отечественной биологии и почвоведения, как Н. В. Тимофеев-Ресовский, В. А. Ковда, С. М. Разумовский, Н. И. Базилевич, А. Н. Тюрюканов, А. А. Титлянова и др.

Большое влияние на научный путь Александра Сергеевича оказало знакомство с представителями созданной А. А. Урановым школы геоботаники, которое переросло в многолетнее и плодотворное сотрудничество с Л. А. Жуковой, О. В. Смирновой и Л. Б. Заугольной. Популяционный подход к изучению функций экологических систем оказался плодотворным методом исследования сложных вопросов биологии, а обширный экспериментальный материал, накопленный в лаборатории А. А. Уранова, позволял переходить от описательного знания к построению моделей и точным математическим формулировкам.

В 1989 г. Александр Сергеевич организует группу диагностики и моделирования биогеоценотических процессов, в которой объединились специалисты из разных областей знаний. В 1995 г. эта группа была преобразована в лабораторию моделирования экосистем.

В начале 1990-х годов, совместно с О. Г. Чертовым (в то время заведующим лабораторией биохимии почв Биологического НИИ Санкт-Петербургского государственного университета), А. С. Комаров начинает разработку системы моделей динамики лесных экосистем. Первая версия модели динамики органического вещества почвы (SOMM) была опубликована в 1996 г. Ее последующая версия (ROMUL) широко известна в стране и в мире. Затем был реализован еще один замысел: в 1997 году была опубликована статья по индивидуально ориентированной модели системы древостоя и почвы, что положило начало системе моделей EFIMOD. Созданные модели применяются для решения широкого круга задач лесной экологии не только в России, но и в других странах — Финляндии, Канаде, Германии, Голландии.

В этих моделях лесных экосистем «впервые в мире» были объединены популяционный и балансовый подходы, что позволило выявить взаимодействие и объяснить особенности продукционных процессов, обусловленные взаимосвязью популяционной структуры растительности и циклов элементов в системе «почва–растительность–климат». Были продемонстрированы стабилизирующая роль почвы и обратная связь между процессами разложения органического вещества в почве и продуктивностью древесной растительности, а экологическая роль рубок, ведущих к изменению структуры популяций деревьев, в накоплении и потерях углерода и азота в лесных экосистемах получила количественные выражения.

Александр Сергеевич, пожалуй, как никто другой, придавал огромное значение пространственной структуре растительного сообщества, важность которой только в последнее время стала осознаваться представителями экологического моделирования. Именно учет пространственной структуры позволяет точнее оценить динамику ведущих переменных и предсказывать эффекты, которые в физике получили название «фазовые переходы».

Одной из воплощенных Александром Сергеевичем идей включения пространственных отношений в модель растительной ассоциации стала модель травянистой и кустарничковой растительности, построенная как совокупность так называемых *клеточных автоматов* — математических объектов, которые взаимодействуют с ближайшими соседями по определенным правилам. Александр Сергеевич неоднократно возвращался к этой модели, которая служила эффективным инструментом проверки биологических гипотез. Ему удалось формализовать понятие *онтогенетических состояний* растения и показать их динамику в демографической структуре сообщества путем обширных имитационных экспериментов с *клеточно-автоматными* моделями. Результаты хорошо согласовывались с экспериментальными данными, что свиде-

тельствоvalo о высоком потенциале этого инструмента научного поиска. Александр Сергеевич по праву считается пионером применения в экологическом моделировании клеточно-автоматной методологии — направления, которое успешно развивается в настоящее время.

А. С. Комаров — автор более 150 научных работ, многие из которых опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах. Он входит в «элитный» список ученых, индекс цитирования которых по базе цитирования Web of Science превышает 1000 ссылок.

В 2008 году увидела свет монография под редакцией А. С. Комарова и О. Г. Чертова «Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах», где обобщены опыт и результаты исследований А. С. Комарова и его коллег за предшествующий период. В предисловии Александр Сергеевич отметил главные особенности моделируемых объектов в биологии (*дискретность, распределенность* (в том числе пространственная), *воспроизводство*, или *репликативность, стадийность* развития, *многокомпонентность* и *нелинейность*), и сформулировал свое видение современного этапа развития экологического моделирования, которое основывается на перечисленных ниже моментах.

1. Все биологические объекты *дискретны* («некисельность жизни» по Тимофееву–Ресовскому). Биологические ткани состоят из клеток, растения — из модулей, популяции — из особей. На всех уровнях организации материи совокупность биологических объектов может рассматриваться как популяция из отдельных «особей» с *взаимодействием*. Особи, объединенные в популяцию, хотя и относительно дезинтегрированы, но связаны сложными и тесными взаимоотношениями.

2. Анализ динамики ансамбля отдельных частиц с взаимодействием привел к ряду выдающихся достижений в физике. На основе описания динамики частиц газа в объеме были выведены уравнения термодинамики, уравнения Навье–Стокса в гидромеханике, были даны теоретическое объяснение фазовым переходам, т. е. скачкообразным изменениям свойств вещества.

Популяционный подход в экологии, основанный на понятии *популяции* как множестве особей, взаимодействующих друг с другом, позволил объяснить холистические эффекты экологических сообществ, такие как *самоподдержание, устойчивость* к внешним воздействиям и другие особенности популяционной динамики. Убирая из рассмотрения распределенность объектов, как в случае классических моделей динамики популяций, мы теряем многие особенности динамики на популяционном уровне, а это в том числе адаптационные механизмы, структура конкурентных отношений и многое другое.

3. Сложность, многокомпонентность экологических систем приводят к тому, что поведение системы должно описываться большим количеством параметров, точность экспериментального определения которых крайне низка, а зачастую носит экспертный характер. Более того, спецификой биологических объектов является присущая им стохастичность, экспериментальный разброс значений измеряемой или наблюдаемой величины. Поэтому при моделировании следует рассматривать зависимость модельной системы от неопределенности, связанной как с низкой обеспеченностью изучаемого параметра экспериментальными данными, так и естественным разбросом его значений. Одним из способов уменьшения числа параметров является проверка *чувствительности* отклика системы к изменению значений параметров.

4. Свойство *стадийности* развития объектов отличает биологические системы от физических. В физике качественные изменения свидетельствуют о структурной перестройке системы. В биологии, напротив, развитие индивидуального объекта во времени естественно выражать в терминах небольшого числа стадий, например, онтогенетических состояний. Это позволяет существенно упростить описание рассматриваемой системы, не теряя при этом в детализации и прогностической ценности модели.

5. *Линейное* приближение количественного описания экологических процессов, свойственное начальному этапу математического моделирования в экологии, является крайне важным, но недостаточным. Наши модели обязаны учитывать *нелинейные* эффекты, так как биологические процессы по своей природе нелинейны. Однако роль нелинейностей не всегда принимается во внимание и часто положение дел далеко от оптимизма, особенно в попытках конкретных прогнозов.

Александр Сергеевич широко понимал свойство нелинейности применительно к экологическим системам, определяя его не только в узко математическом смысле, но и как гносеологический принцип неопределенности в предсказании поведения системы, исходя из неполноты начальных данных и множественности траекторий развития системы. В отличие от линейных систем, которые он называл «скучными», нелинейные системы через цепочки обратных связей способны к парадоксальному (контринтуитивному) поведению, которое не «просчитывается» изначально. *Открытость* экологических систем, т. е. незамкнутость по потокам вещества и энергии, ведет к таким особенностям нелинейного поведения, как множественность стационарных состояний, периодичность, квазистохастичность и т. д. Задача исследователя, как он считал, состоит в том, чтобы увидеть «паттерны», т. е. закономерности, в таких разнородных и плохо упорядоченных экспериментальных и модельных данных. Возможно, поэтому книга Дж. Займана «Модели беспорядка» долго служила ему настольной книгой.

Работы авторов настоящего выпуска отражают современные тенденции в развитии моделирования в экологии, в которых так или иначе затрагиваются особенности, которые отмечал Александр Сергеевич. Они охватывают разнообразный материал и используют различные методы, поэтому классификация и отнесение определенной работы к той или иной теме неизбежно страдают неточностью. Тем не менее выделяются три структурных блока, которые могут охарактеризовать самые общие черты в предлагаемых вниманию читателя модельных подходах. Это модели динамики популяций, индивидуально-ориентированные модели био- и экологических систем и раздел, включающий моделирование потоков вещества и энергии в наземных экосистемах.

### ***Модели динамики популяций***

Работа представителей одной из ведущих российских школ математической экологии — школы Е. Я. Фрисмана — на первых страницах нашего номера и на передовых рубежах исследований по теоретической эволюционной экологии. Две ветви, что сплелись в этой молодой науке, — математическая теория динамики взаимодействующих популяций, начатая работами Альфреда Д. Лотки (1925) и Вито Вольтерра (1926), и теоретическая популяционная генетика, заложенная трудами Джона Б. С. Холдейна (1924) и Рональда Э. Фишера (1930), — долгое время развивались параллельно, решая свои задачи в рамках разных математических моделей относительно разных переменных. Переменными предложенной ныне — *эколого-генетической* — модели служат частоты аллелей (одного диаллельного гена) и стадийная структура (детеныши и взрослые) в популяции песцов *Alopex lagopus*. Ген определяет репродуктивные стратегии и выживаемость детенышей, а характер отбора и динамика популяции (и пищевого ресурса) принципиально различны в рассмотренных вариантах модели — для прибрежных, континентальных и искусственных популяций песцов. Всесторонний анализ динамических режимов выявил наличие устойчивого мономорфизма по рассматриваемому признаку в популяциях прибрежных песцов и возможность полиморфизма с циклическими колебаниями численности и частот аллелей в континентальных популяциях. Для искусственных популяций под действием селективного отбора, осуществляемого фермерами ради успешного воспроизводства, модель дает оценку скорости вытеснения аллеля, ответственного за низкую численность помета. Иными словами, предложенные варианты модели отражают реально существующее генетическое разнообразие популяции по размеру помета и могут служить инструментом в научной поддержке принятия управленческих решений.

Не менее практична и следующая теоретическая статья номера, представляющая модель динамики популяций в трофической цепи из 3 уровней: зоопланктона, мирной и хищной рыбы; причем рассматриваются возрастные классы зоопланктона и «стадийные» (по массе тела) группы у рыб. Пожертвовав традиционным для трофических цепей, последовательным расположением уровней в концептуальной схеме модели, авторы сумели изобразить и жизненные циклы, и трофические связи на единой схеме. Заявленная в заголовке «целочисленность [абсолютного] размера популяции» есть отражение бесспорного эмпирического факта, который тем не менее довольно редко учитывается в популяционных моделях. Столь естественная идея наталкивает-

ся на «естественное» для математики препятствие: чтобы *целочисленный* вектор отображался в целочисленный (*инвариантность* множества натуральных чисел), оператор отображения должен удовлетворять жестким условиям (например, иметь только рациональные коэффициенты в простейшем линейном случае). Нелинейности и, в частности, степенные аллометрические зависимости с нецелым показателем степени лишают модель всяких надежд на инвариантность. Но препятствие легко обходится в машинной реализации любой модели алгоритмически через учет только *целой части* значений соответствующих переменных (почему не *округлением* до целых?). И машинные эксперименты с построенной моделью при вариациях ее параметров обнаружили богатое разнообразие динамических режимов — как стационарных, так и колебательных, в том числе хаотических. В этом смысле целочисленность ничуть не снизила остроту связанной с хаосом проблемы непредсказуемости размера популяций, типичную для моделей в классической *вещественной* постановке, но внесла свои особые черты в динамическую картину, в частности эффекты конкуренции между разными динамическими режимами.

В работе В. Г. Суховольского с коллегами модель динамики насекомого-вредителя несколько отходит от классических традиций моделирования динамики популяций. В жертву принесена структурная составляющая, которая позволяет разглядеть в параметрах уравнения, описывающего изменения численности популяции, биологический смысл в пользу прогностической ценности модели, отвечающей на вопрос: «А что случится с численностью, если...». Динамика популяции опасного вредителя древостоя, сосновой пяденицы, представлена авторегрессией второго порядка, а внешнее воздействие зависит от погодных характеристик. В работе описана методика, позволяющая предсказывать вероятность риска вспышки вредителя.

Особняком в этой рубрике стоит работа А. В. Немчиновой, ибо в ней не рассматриваются размеры популяций в явном виде. Переменными модели служит распределение вероятностей 32 состояний лесного массива, определенных автором в терминах «сформированности вертикальной структуры лесных сообществ и их насыщенности позднесукцессионными видами». Отталкиваясь от обычного марковского формализма в описании сукцессии, автор отказывается от фиксации временного шага в хронологических единицах (годах), а временную ось размечает в сущности абстрактными моментами переходов между выделенными состояниями цепи. Такое приближение к объективной картине сукцессионного процесса потребовало изобрести новый оригинальный метод калибровки переходной матрицы марковской цепи по данным о фактическом числе сообществ в разных состояниях. Калиброванная матрица позволила вычислить относительные времена достижения климакса из каждого состояния по отношению к самому длительному ходу сукцессии и на этой основе описать закономерности хода сукцессии и предложить типизацию состояний.

А. Г. Топаж с соавторами представили работу, в которой обсуждается соотношение дискретного и непрерывного в моделях динамики популяций. В работе обосновывается точка зрения, что квантование времени, которое по своей природе является непрерывной величиной, как ни парадоксально, расширяет структурную сложность модели, и делается попытка найти аналогии дискретным по времени моделям динамики популяции в классе непрерывных. Последовательно усложняя модель, авторы выходят за рамки классических уравнений и вторгаются в область индивидуально-ориентированного моделирования, перекидывая мостик от первой группы работ к следующей.

### ***Индивидуально-ориентированные модели биосообществ и экологических систем***

В своей работе «Марковские поля и растительные сообщества» (1979) А. С. Комаров провел водораздел между классическими моделями динамики популяций и моделями экологических систем, отметив, что моделирование биологических популяций исторически (вслед за работами А. Лотки и В. Вольтерры) пошло по пути описания систем в терминах концентраций по аналогии с моделями химической кинетики, что позволило использовать аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений. Такие модели позволяют описывать характер поведения достаточно сложных биологических систем и даже распространять такое описание на экологические

ситуации. Наиболее содержательные результаты получены в тех случаях, когда пространственная структура не играет заметной роли, как, например, для микробных популяций в искусственных условиях. Однако при моделировании экологических систем нельзя игнорировать пространственный аспект, так как реальные события происходят в пространстве и сила взаимодействия часто определяется удаленностью объектов друг от друга. Объединить эти два подхода удалось с помощью компьютерных моделей, названных *индивидуально-ориентированными*. Самый простой класс моделей такого сорта — модели клеточных автоматов. Но уже такие простые модели позволили описать сложное поведение ценопопуляций травянистых растений.

Коллеги и ученики Александра Сергеевича Комарова Е. В. Зубкова, Л. А. Жукова, П. В. Фролов, В. Н. Шанин представили обзор работ А. С. Комарова по моделям динамики ценопопуляций травянистых растений на основе клеточных автоматов от времени зарождения идеи до современных моделей, в которых клеточные автоматы объединены с алгоритмами роста, так называемыми *L*-системами.

Новый класс индивидуально-ориентированных моделей введен в работе Н. В. Белотелова и И. А. Коноваленко. Особенностью модели является то, что объектам позволено двигаться в пространстве согласно определенным правилам. Новая модель идеологически близка агентному моделированию, которое подразумевает определенную свободу выбора поведения объекта в зависимости от индивидуальных предпочтений. Модель демонстрирует «стадное» поведение при определенных параметрах взаимодействия между особями, которое может перейти к «обособленному» для другого набора параметров.

Новая работа В. В. Галицкого — бесспорное украшение номера от мирового лидера в моделировании индивидуального роста дерева — делает очередной шаг вперед, переходя от уникальной по своим возможностям секционной модели роста *свободно* растущего дерева к росту *несвободному*, т. е. в условиях конкуренции за пространство. Доступная дереву площадь и ее неравномерное распределение в сообществе деревьев формализованы через *полигоны Вороного*, и динамика зеленой биомассы заданного дерева закономерно приобретает ограничения по азимуту. Но на макушке дерева появляются и растут свободно новые секции, в результате чего вверх по стволу бежит «волна» биомассы.

Работа П. Я. Грабарника «Методы оценивания параметров случайных точечных полей с локальным взаимодействием» посвящена статистике случайных точечных полей. Первопроходцами в этой области были физики, и названия методов сохраняют следы их прошлых заслуг: алгоритм Метрополиса, метод Монте-Карло, который впервые использовался в расчетах ядерных реакций, и т. д. Многие задачи в этой области инспирированы проблемами, возникающими в экологии, биологии и других науках, где пространственный аспект играет существенную роль. Отталкиваясь от практических проблем, которые в начале 80-х интересовали А. С. Комарова в связи с количественным анализом конкурентных отношений между растениями, автор разрабатывает новые методы статистической теории оценивания, область применения которых значительно шире моделирования растительных сообществ.

Статья И. В. Припутиной, Г. Г. Фроловой и В. Н. Шанина «Выбор оптимальных схем посадки лесных культур: компьютерный эксперимент» перекидывает мостик от моделей биосообществ к моделированию циклов веществ в системе «почва–растение–атмосфера». В ней представлены результаты компьютерных исследований, связанных с оценкой и прогнозированием продуктивности древостоев, круговоротов азота и углерода в лесных плантациях. Использована хорошо известная в России и в мире система моделей EFIMOD, созданная А. С. Комаровым совместно с О. Г. Чертовым при участии сотрудников лаборатории моделирования экосистем ИФХиБПП РАН. Эта знаменитая модель продолжает приносить научные плоды. Хотя речь идет о быстрорастущем виде (осине *Populus tremula* L.) и коротком (30 лет) обороте рубки, результаты соответствующих экспериментов в поле потребовали бы не один «оборот» поколений исследователей для всего того разнообразия почвенных и климатических условий и сценариев управления, которое реализовано в модели. Представленные материалы характеризуют нарастающую тенденцию превращать экологические модели в инструмент для решения прикладных задач природопользования.

**Моделирование потоков вещества и энергии в наземных экосистемах**

Первичная продукция — главный источник энергии в круговороте органики и элементов минерального питания через экосистемы. Поэтому столь важна оценка скорости продукционного процесса, чему посвящена статья А. В. Ольчева, открывающая данный раздел спецвыпуска. Проблема столь же стара, как и осознание важности самих круговоротов, но автор применяет новаторский метод, использующий современные знания по физиологии растений и биофизике фотосинтеза и современные технологии добычи данных — инструментальные замеры и дистанционное зондирование. Относительно простая нелинейная модель позволяет рассчитать суточные и месячные значения валовой (GPP) и нетто (NPP) первичной продукции лесов по параметрам, характеризующим эффективность использования растениями фотосинтетически активной радиации (ФАР). Модельные расчеты сравнивались с «импортными» данными экспериментальных наблюдений за величиной поглощенной ФАР и потоками CO<sub>2</sub> над пологом леса (в Германии и Индонезии).

Следом, как пример «импортозамещения», представлена «Модель газообмена CO<sub>2</sub> сфагнового верхового болота» А. Г. Молчанова и А. В. Ольчева, для калибровки которой в 2014 г. была проведена серия экспериментов по непосредственному замеру потоков CO<sub>2</sub> с поверхности неосушенного болота в Московской области (в его облесенной и открытой частях). В модели учтена зависимость газообмена от влажности верхнего слоя почвы, приходящей суммарной солнечной радиации, температуры почвы и воздуха, и авторы дают исчерпывающий ответ на злободневный вопрос «Источник или сток?» в отношении данной экосистемы.

Но «исчерпывающие» ответы кажутся таковыми лишь на первый взгляд. Если в упомянутых выше экспериментах через камеры газоанализаторов «постоянно поддерживался проток атмосферного воздуха», то в жизни все гораздо сложнее: турбулентный перенос в приземном слое атмосферы зависит не только от капризов локальной погоды, но и от геометрии и прочих свойств неоднородного растительного покрова, например *LAI* (leaf area index). Это убедительно показали физики-математики Н. Т. Левашова и Ю. В. Мухартова, выполнившие в соавторстве с А. В. Ольчевым «Трехмерное моделирование турбулентного переноса в приземном слое атмосферы с применением теории контрастных структур». Модельные эксперименты в условиях, характерных для вырубки и древостоя, выявили значительную асимметрию в распределении поля ветра внутри древостоя и над ним относительно основного направления скорости ветра. Так теоретические уравнения математической физики могут стать практическим инструментом оценки риска ветровалов при планировании рубок на конкретном участке леса.

Наверное, нет сегодня более обсуждаемой научной проблемы, чем глобальная температура и потепление климата. Главной причиной современного потепления называется усиление парникового эффекта атмосферы, вызванное антропогенными эмиссиями парниковых газов, в первую очередь CO<sub>2</sub>. Но существуют и конкурирующие точки зрения, среди которых популярна вера в то, что нынешний рост глобальной температуры есть просто проявление цикличности климата Земли вследствие планетарных причин, а в будущем нас ждет глобальное похолодание. Д. Г. Замолотчиков предлагает простую статистическую модель, которая сглаживает исторический ряд глобальных температур с помощью комбинации лог-линейной функции от концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере и двух синусоид по времени разной амплитуды, фазы и периода. Калибровка параметров методами регрессионного анализа дала хорошие статистические показатели, причем синусоиды получили периоды в 10.5 лет и 68.8 года, что допускает их интерпретацию как циклов солнечной активности близких периодов. Прогнозы предложенной модели до 2100 г. по каноническим сценариям IPCC (2013) роста концентрации CO<sub>2</sub> дают более умеренный рост глобальной температуры, чем официальные прогнозы IPCC, которые, по мнению автора, слишком пессимистичны.

Коллеги А. С. Комарова и соавторы многих его работ О. Г. Чертов и М. А. Надпорожская представили краткий обзор современного state-of-the-art в моделировании органического вещества почв и наиболее узких мест в данной проблематике. В работе подчеркивается, что почвенные процессы, трансформация органического вещества под воздействием различных факто-

ров, — это область экологии и биологических наук, наименее проработанная в моделях, и именно здесь ожидаются прорывы в понимании взаимодействия косной и живой материи, в чем значительную роль будет играть математическое и компьютерное моделирование.

В работе Т. А. Архангельской с соавторами обсуждается гипотеза о причинах различного уровня залегания карбонатов в почвах-агроземах, на которых в течение долгого времени поддерживался разный режим агромероприятий. Возможное объяснение механизма наблюдаемого явления авторы получают из результатов машинных экспериментов с моделью гидрологического режима почв при разных сценариях выпадения и количества осадков на соседствующих участках под кукурузой в монокультуре и черным паром. Статья свидетельствует в пользу расширения инструментария исследователя-предметника методами моделирования и компьютерных исследований.

Сборник завершается кратким обзором ляпуновско-молчановских Школ по математическому моделированию в биологии, написанным Аргентой Антониновной Титляновой — непосредственным участником многих школ, начиная с самой первой. Публикация обзора материалов прошедших Школ дает возможность нынешнему поколению молодых ученых ощутить творческую атмосферу того времени и представляет не только исторический интерес. По глубине, остроте и важности обсуждавшихся на Школах тем хорошо видно, что они до сих пор актуальны и могут служить источником новых идей и подходов в моделировании экологических систем.

Описание ляпуновско-молчановских Школ перекидывает мостик ко дню сегодняшнему. Комаровские конференции «ЭкоМатМод» сыграли огромную «средообразующую» роль для формирования устойчивого потока поколений ученых, занятых моделированием сложных био- и экологических систем. Роль Александра Сергеевича Комарова в этом невозможно переоценить. Поступательное развитие и сохранение традиций, заложенных пионерами моделирования в биофизике и экологии, — наша сегодняшняя задача, и специальный номер журнала Ки&М — достойный вклад в ее решение.

*П. Я. Грабарник, Д. О. Логофет,  
редакторы спецвыпуска,  
Пушино–Москва, апрель 2016 г.*