

*Это русский вариант статьи, опубликованной на английском языке в журнале Russian Journal of Ecosystem Ecology: Belotelov N. Influence of V. G. Gorshkov's works on the development of mathematical models of ecosystems // Russian Journal of Ecosystem Ecology. Vol. 5 (2). – DOI 10.21685/2500-0578-2020-2-7*

*В авторской редакции!*

УДК 519.87

## **ВЛИЯНИЕ РАБОТ В.Г. ГОРШКОВА НА РАЗВИТИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭКОСИСТЕМ.**

Н. В. Белотелов

*ФИЦ ИУ РАН Вычислительный Центр им.А.А. Дородницына, Москва, Вавилова, 40,*

*e-mail: belotel@mail.ru*

**Аннотация.** В работе обсуждается последняя статья В.Г. Горшкова и А.М. Макарьевой «Фундаментальные экологические параметры неподвижной и передвигающейся жизни». Проводится обзор основных теоретических результатов, полученных В.Г. Горшковым за последние 40 лет. Анализируется проблема совместного использования при моделировании экосистем популяционного и масс- энергетического подходов. Высказывается мнение о том, что при исследовании экологических систем необходимо заимствовать методологические разработки современной физики, но при этом системно и тщательно согласовывать системы понятий, разработанных в физике и биологии, используя язык математического моделирования.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, популяционные модели, модели круговорота биогенных элементов, размерный спектр.

## **INFLUENCE OF V. G. GORSHKOV'S WORKS ON THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF ECOSYSTEMS.**

N. Belotelov

*FIC IM CC RAS named by A. A. Dorodnicyn, 40 Vavilova street, Moscow, 119333, Russia*

*e-mail: belotel@mail.ru*

**Abstract.** This paper discusses the latest article by V. G. Gorshkov and A. M. Makarieva the "Fundamental ecological parameters of a stationary and moving life." A review of the main theoretical results obtained by V. G. Gorshkov over the past 40 years is conducted. The problem of joint use of population and mass energy approaches in ecosystem modeling is analyzed. It is suggested 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 developed in physics and biology, using the language of mathematical modeling.

**Key words:** mathematical modeling, population models, biogenic element cycle models, size spectrum.

Поводом к написанию статьи послужила последняя работа [1] замечательного ученого – Виктора Георгиевича Горшкова, который внес значительный вклад в теорию количественного, физико-математического описания экологических систем. За почти 40-летний период активной научной работы в области количественной экологии им была создана оригинальная целостная теория, которая позволила по-новому взглянуть на процессы, происходящие в биосфере. Поскольку Виктор Георгиевич первоначально работал в области теоретической физики, в основе его теоретических построений лежали физические подходы. Основные положения его концепции были изложены в монографии [2]. Обсуждаемая статья [1], с моей точки зрения, детализирует и уточняет некоторые идеи, высказанные в этой монографии.

Перечислим основные исходные теоретические и экспериментальные предположения, лежащие в основе концепции В.Г. Горшкова:

- Постоянство потока солнечной энергии;
- «Живые организмы не должны использовать вещества, концентрации которых не могут регулироваться биотой»;
- Равенство мощностей потоков синтеза и деструкции органического вещества, генерируемых биотой. Причем, мощности этих потоков столь велики, что рассогласование может привести к разрушению биоты за время 10-100 лет;
- Конкурентное взаимодействие в биоте сохраняет генетические программы, обеспечивающие максимальное замыкание круговорота биогенных элементов.

Из этих предположений, с использованием ряда допущений, Горшков приходит к следующим выводам. Прежде всего, существующее состояние биосферы возможно только при строгом равенстве скоростей биологического синтеза и разложения, то есть высокой степени замкнутости биохимических круговоротов веществ. Огромная мощность синтеза и разложения, развиваемая

биотой Земли, необходима для быстрой компенсации всех возникающих внешних флуктуаций. Произвольный набор жизнеспособных организмов не может обеспечить устойчивости окружающей среды. Жизнь, используя солнечное излучение как источник энергии, организует процессы преобразования окружающей среды на основе динамически замкнутых круговоротов веществ, потоки которых на много порядков превосходят внешние потоки разрушения окружающей среды внешними силами.

Особенно хотелось бы отметить следующие результаты, полученные Виктором Георгиевичем, - доказательство существования устойчивого, так называемого, размерного спектра потребления первичной продукции [2]; анализ скоростей информационных потоков в биосфере и сравнение их с информационными потоками в человеческой цивилизации [2]; и, конечно же, формулировка принципа «биотического насоса», который связывает эвапотранспирацию растительного покрова с атмосферными осадками [3]. Именно биотический насос обеспечивает перенос влаги, испарившейся над океаном, в глубину суши.

Работы Горшкова вызвали острые дискуссии в конце 1980-х годов в среде специалистов, занимавшихся математическим моделированием экологических систем. Отношение Виктора Георгиевича к математическому моделированию в экологии было чрезвычайно прохладным и основывалось оно на двух принципиальных положениях. Первое сводилось к тому, что в экологии измерения фазовых переменных, входящих в модель, как правило, не точны. А другим возражением было то, что неизвестны функциональные зависимости, связывающие скорости потоков изменения фазовых переменных модели со значениями самих фазовых переменных. Отголоски этой позиции присутствуют в тексте обсуждаемой статьи: «...проблема неустойчивости экосистемы в присутствии крупных животных не получила рассмотрения в экологической литературе. Одна из причин этого в том, что математические уравнения, используемые в популяционной динамике, в частности,

различные модификации уравнений Лотки-Вольтерра, не содержат возможности вымирания животных. Эта проблема получила название проблемы атто-лисы (atto-fox problem), приставка атто- соответствует умножению на  $10^{-18}$  (Sary, Lobry 2016; Mollison 1991). В этих моделях даже при достижении бесконечно малой численности популяции вида – например, до  $10^{-18}$  особей лисиц на квадратный километр, как в работе Mollison (1991), возможно её восстановление до реалистичных наблюдаемых значений. Поэтому сценарий вымирания вида математически не существует; его требуется задавать вручную. Если не задать вымирание, популяция будет существовать вечно, колеблясь между бесконечно малыми и обычными значениями численности. Можно также искусственно исключить бесконечно малые значения численности. Так, например, в модели плейстоценовых степей при уменьшении численности крупных животных ниже одной особи на тысячу квадратных километров, численность автоматически повышалась до этого значения (Zhu et al. 2018). (Отметим, что многие крупные животные имеют индивидуальную кормовую территорию порядка тысячи квадратных километров (Makarieva et al. 2005б), поэтому для крупных животных плотность численности  $10^{-3}$  особи/км<sup>2</sup> является скорее нормальной, чем низкой.) Очевидно, что при таком подходе устойчивость экосистемы исследовать невозможно».[1]

В вышеприведенном фрагменте явно видно отношение к математическому моделированию в экологии, и эта установка, как я уже говорил выше, имеет длительную историю. Отчасти она справедлива, но есть некоторые моменты, на которых хотелось бы остановиться.

Появление В.Г. Горшкова в лаборатории «Математической экологии» ВЦ АН СССР со своей концепцией вызвало большое возмущение. С одной стороны, исходя из физических аналогий и оценок, он получал результаты, которые не получались из имитационных моделей. С другой стороны, было видно, что сама проблема математического моделирования была ему

неинтересна. Сейчас, по прошествии тридцатилетнего периода, приходит осознание, что многие проблемы были связаны с языком.

Человек живет в языке. Все понимание и объяснение субъектом себя и окружающего мира загадочным образом уместается в языковых конструкциях, которые формируют миропонимание человеком окружающего его мира. Когда мы говорим, что понимаем, как устроен окружающий нас мир, это означает, что мы используем определенные понятия и из них, в соответствии с общепринятыми представлениями в тот или иной момент истории развития человечества, выстраиваем некоторые логически непротиворечивые конструкции, которые, как нам кажется, позволяют объяснить наблюдаемые в окружающем мире явления. Удивительным является то, что вчера мы удовлетворялись одним объяснением наблюдаемых явлений, сегодня другим, а завтра... А язык – это код плюс история.

Эту проблему очень хорошо осознавал Н.Н. Моисеев. В своей первой книге [4], посвященной анализу возможности изучения плохо формализованных и плохо измеримых процессов с помощью математического и компьютерного моделирования, он пишет: «Математика – это ещё и язык, и, как всякий язык, – это форма мышления. Этап математизации дисциплины начинается тогда, когда дисциплине уже не хватает того естественного языка, с помощью которого начиналось её становление, когда возможности этого языка для прогресса науки оказались исчерпанными. Физика перешагнула этот рубеж во времена Ньютона: нельзя изложить классическую механику, не прибегая к языку математических моделей. Но введение нового языка всегда требует генеральной перестройки дисциплины.»

Если ненадолго вернуться к истокам физики, то понятие «энергия», которое является основной в концепции В.Г. Горшкова, как естественнонаучная категория появляется в «Аналитической механике» Лагранжа. И возникает она из математики: механическая работа есть скалярное произведение векторов силы на перемещение. И, уже из инварианта механического движения –

механической энергии, в 19 –ом веке энергия становится фундаментом для описания неживой материи. Э. Ферми в своем учебнике «Термодинамика» 1937 года при введении понятия «внутренняя энергия тела» пишет: «Если мы хотим остаться в рамках принципа сохранения энергии, то...». В этом смысле физические категории, которые используются В.Г. Горшковым, вообще говоря, опираются на математические модели.

«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.» [5]

Этап математизации экологии, как и других описательных наук, начался в середине 20-го века, когда развитие системы понятий о неживой материи – физики, ошеломило научную общественность. Другим фактором стремительного проникновения математических методов в описательные науки явилось появление и развитие электронно – вычислительных машин (ЭВМ). [6]

Именно в тот момент, когда ЭВМ стали «входить в массы» – машины третьего поколения – возник бурный интерес к математическому моделированию в экологии, экономике, социологии и в других дисциплинах, которые можно отнести к гуманитарным наукам.

В настоящее время оформилось даже научное направление «математическая биология» — это междисциплинарное направление науки, в котором объектом исследования являются биологические системы разного уровня организации, причём цель исследования тесно увязывается с решением некоторых определённых математических задач, составляющих предмет исследования. Критерием истины в ней является математическое доказательство. Основным математическим аппаратом математической биологии является теория дифференциальных уравнений и математическая статистика»[7]. Хотя, конечно же, математическое доказательство само по себе не может дать дополнительное знание, оно может лишь позволить по-новому взглянуть на ранее существовавшие понятия, которыми пользуются биологи. Причем ясно, что существующие физико-математические языки на современном уровне развития не могут полностью удовлетворить биологов. «События, происходящие в мире физическом, натянуты на устойчивые в своих численных значениях фундаментальные постоянные. В этом смысле состоит стационарность этого мира. В мире живого, конечно, есть свои постоянные, но они не поднимаются до ранга фундаментальных констант. Это такие же нефундаментальные постоянные, как, скажем, в физике период полураспада атома или температура плавления металла. Их числовые значения не являются

критическими для существования самого мира. Отсюда становятся понятными неудачи с моделированием экосистем языком дифференциальных уравнений (об этом мы уже ранее говорили в работе Налимов В.В. 1983, Анализ оснований экологического прогноза. Воросы философии №1 198-217).» [8]

Основным вопросом, связанным с развитием науки, является создание и развитие понятийного аппарата, то есть 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.[6]

Директор ВЦ АН СССР академик А.А. Дородницын писал: «Построение математической модели – это, прежде всего, определение структуры оператора, а для этого алгоритмов нет...

«Моделист» находится в плену существующей математики: он пытается описать явления в новых областях с помощью известных математических структур – в основном дифференциальных уравнений, иногда с введением конечно-разностных соотношений.... только создание новой математики – дифференциального и интегрального исчисления – позволило сформулировать математическую модель движения...задачу внедрения информатики в «описательные» науки я считаю одной из важнейших, быть может, самой важной проблемой близкого будущего.» [9]

Из вышесказанного следует, что математические модели в экологии безусловно уместны, но лишь бы они создавались не ради математики, а ради решения и обсуждения определенных экологических проблем. А постановка самих проблем, конечно же, остается за специалистами в области биологии и экологии. Или хотя бы полученные результаты математического моделирования понимались биологами.



В этом смысле мне очень нравится результат В.Г. Горшкова о существовании устойчивого размерного спектра потребления, о котором я говорил выше. Дело в том, что 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 таком описании, являются концентрации или численности популяций. Эти два подхода не сводимы друг к другу, а размерный спектр потребления, проводя аналогию с квантовой механикой, играет в каком-то смысле роль принципа дополнительности Бора или принципа неопределенности Гейзенберга. И было бы очень интересно, возвращаясь к статье [1], оценить не максимальную мощность, потребляемую «подвижной» биотой, а распределение по размерам и связать это распределение с распределением по продукции «неподвижной» биоты. При этом было бы совсем замечательно учесть эвапотранспирационные процессы.

По-видимому, грубые оценки мощности крупных фитофагов, которые приводятся в работе [1], не позволяют оценить полностью сложную динамику, и в частности, устойчивость ненарушенных экосистем и роль животных в этой динамике. Дело в том, что крупные фитофаги естественным образом сильно влияют на скорость оборота лесной мозаики, что сказывается на локальном гидрологическом цикле, то же можно сказать о бобровом комплексе, о котором упоминается в статье [1]. Возможно, что деятельность этих животных, за счет увеличения увлажнения территории при определенных условиях, повышает продуктивность лесных и пастбищных систем, и оценки, приведенные в работе в качестве примера, не совсем корректны. По крайней мере, некоторые работы по анализу данных в экосистемах, активно не преобразованных человеком, наводят на такую мысль.

Хотелось бы высказать ещё незначительное замечание. Оно связано с терминологией. Термины «подвижная и неподвижная жизнь» вызывают неудовлетворение. Жизнь, по своей сути, – это всегда движение в пространстве и во времени, безусловно, на своих характерных масштабах. Было бы желательно этот момент как-то обсудить, дабы у читателей, особенно это касается людей с биологическим образованием, не возникало терминологического диссонанса.

#### Заключение.

В своей монографии [2] В.Г. Горшков писал: «Цель работы – продемонстрировать существование природной биологической регуляции окружающей среды и доказать невозможность сохранения устойчивой, пригодной для жизни человека окружающей среды при существующих сейчас тенденциях преобразования современной биосферы.»

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

Современные информационные технологии – статистическая обработка данных (big data), нейросети, deep learning и другие подходы, которые позволяют эффективно обрабатывать, визуализировать, анализировать (если ясно, для чего) огромные массивы информации, не позволяют при этом улучшать наше понимание изучаемых явлений. «Мы видим то, что понимаем» (А. Эйнштейн), то есть 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.

С другой стороны, 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.

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, как хочется надеяться, в перспективе позволит сделать математическую экологию действительно предсказательной наукой, в каком-то смысле похожей на стройную структуру математической физики. Для решения этих проблем необходимо активизировать системное междисциплинарное научное изучение биосферных процессов, опираясь на биологические и физические описания экосистем. При таком междисциплинарном подходе важнейшую роль будут играть математические модели. Безусловно работы В.Г. Горшкова будут важным этапом в этой деятельности.

### Литература

1. Горшков В.Г., Макарьева А.М. Фундаментальные экологические параметры неподвижной и передвигающейся жизни. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2020,5(1).
2. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. – М., ВИНТИ, 1995,

3. Gorshkov V.G., Makarieva A.M. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11, 1013-1033.
4. Моисеев Н.Н. Математика ставит эксперимент, Наука, 1979
5. Бор Н. Единство знаний Избранные научные труды. – М., Наука Т.2., 1971, 481-497с.
6. Белотелов Н.В. О возможных направлениях развития математической экологии. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2018,3(4).
7. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Математическая\\_биология](https://ru.wikipedia.org/wiki/Математическая_биология)
8. Налимов В.В. Разбрасываю мысли. В пути и на перепутье. – М.: Прогресс-Традиция, 2000
9. Дородницын А. А. Информатика: предмет и задачи //Кибернетика. Становление информатики. М.: Наука, 1984.
10. Smirnova, O. V. Natural zonality of the forest belt of Northern eurasia: myth or reality? Part 1 (literature review) / O. V. Smirnova, A. P. Geraskina, V. N. Korotkov // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. – 2020. – Vol. 5 (1). – DOI 10.21685/2500-0578-2020-1-2.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-010-00423).