

ИСТОРИЯ НАУКИ

Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии.
2024. – Т. 33. – № 2. – С. 59-67.

УДК 93.504 + 574 / 51-76

DOI: 10.24412/2073-1035-2024-33-2-59-67

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОСИСТЕМ Г. БРЕМЕРМАННА С КОММЕНТАРИЯМИ

(Hans-J. Bremermann von. *Mathematische Modelle von biologischen Systemen* // *Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg*. 1971. V. 60. S. 112-113.
Ганс-И. Бремерманн. Математические модели биологических систем)

© 2024 Г.С. Розенберг, Н.В. Костина, А.Г. Розенберг

Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал
Самарского федерального исследовательского центра РАН, г. Тольятти (Россия)

Поступила 29.05.2024

Аннотация. Представлен перевод и обсуждается статья немецко-американского биофизика Ганса Бремерманна о проблемах математического моделирования биологических систем. Рассмотрены некоторые решения сформулированных проблем, которые удалось получить за последние 50 лет.

Ключевые слова: экосистема, эволюция, принципы, законы, методология, теория

В «Бюллетене Фрайбургского общества естествоиспытателей» в 1971 г. была опубликована двухстраничная заметка немецко-американского биофизика Г.-И. Бремерманна, которая оказала

заметное влияние на становление и развитие математического моделирования сложных биологических систем (в т. ч. и экологических). Первоначально, приведем наш перевод этой статьи.

Ганс-И. Бремерманн. Математические модели биологических систем)

Hans-J. Bremermann von.

Mathematische Modelle von biologischen Systemen

Dept. of Mathematics, University of California, Berkeley, California, USA

На сегодняшний день не найдено никаких принципов, на основе которых можно было бы точно определить поведение биологических систем и организмов. Из трёх возможных причин такого положения дел – 1. отсутствие таланта (*Genie*), 2. недостаточное исследование и 3. принципиальная невозможность – я склоняюсь к третьей.

Прецеденты есть: алхимики долгое время пытались найти химические процессы, позволяю-

щие получать золото из других веществ. Сегодня мы знаем, что атомы (например, золото) не могут быть ни созданы, ни уничтожены в химических реакциях. Второй пример – вечный двигатель. Это невозможно по закону сохранения энергии. Хотя эти примеры связаны с химическими или физическими принципами, существуют также проекты, которые невозможны по чисто математическим причинам; в частности: трисекция угла и удвоение куба с помощью циркуля и линейки, разрешение уравнений пятой и выше степени радикалами и решение выводимости в исчислении предикторов. Хотя в этих случаях доказательство невозможности сложно и было представлено только в XIX или XX веках, доказательство того, что сторона и диагональ квадрата не имеют общей меры, элементарно и было известно уже пифагорейцам. В древности признали несоизмеримости стороны и диагонали об-

Розенберг Геннадий Самуилович, руководитель науч. направления, докт. биол. наук, профессор, чл.-корр. РАН, genarozenberg@yandex.ru; *Костина Наталья Викторовна*, докт. биол. наук, ст. науч. сотр., knva2009@yandex.ru; *Розенберг Анастасия Геннадьевна*, канд. биол. наук, науч. сотр., chicadivina@yandex.ru

рушило максимуму Пифагора: «Все есть число» и привело к геометризации и аксиоматизации греческой математики, оказавшей большое влияние на естествознание вплоть до наших дней. Знаменитые «Начала» Евклида – книга, выдержавшая наибольшее количество изданий после Библии.

В ньютоновских «Принципах» сформулированы основные законы механики, аналогичные аксиомам Евклида, и с этих времен концепции общих принципов и законов природы, из которых (по крайней мере, в лучшем случае) могут быть выведены все физические и химические явления, стали самоочевидной основой естественно-научной теории. Однако в 1930-х годах Гёдель² обнаружил неполноту арифметики, и теперь предполагается, что все аксиоматизации арифметики неполны. Это значит, что понятие полной аксиоматизируемости математики отпадает и аналогично приходится ставить под сомнение вполне дедуктивное естествознание.

Даже если бы известные сейчас законы физики и химии были точными и полными (что сомнительно), поведение организмов не поддается столь лёгкому описанию, поскольку такое поведение является результатом очень сложных взаимодействий между сложными молекулами. Все известные «*ab initio*» методы расчёта химических взаимодействий сложных химических молекул полностью трансвычислимы (*transkomputabel*), т.е., они требуют больше арифметических операций, чем физически возможно.

Остаётся только метод математического моделирования, который максимально приближенно описывает поведение организмов (и других систем), но не отражает точно всех деталей. Фактически, математические модели уже довольно давно используются для многих целей в медицине, биологии, экономике и социальных науках. Однако методология в основном носит ситуативный характер и не продумана с научной точки зрения. Она находится в состоянии, подобном состоянию геометрии у древних египтян и вавилонян, которые знали множество приемов и отдельных методов, но не имели строгих доказательств. Важно довести методологию математи-

ческих моделей до такого же уровня точности, как это сделали греки с евклидовой геометрией.

Гордонская конференция³ этого года по теоретической биологии и биоматематике (в Нью-Гемпшире) показала, что мы ещё далеки от этой цели. Предлагается большое количество математических моделей, каждая из которых синтезирована на основе «правдоподобных» предположений и упрощений. Однако в целом отсутствует методология адаптации и проверки моделей на экспериментальных данных. Например, Джей Форрестер (изобретатель памяти на магнитных сердечниках, используемой почти во всех современных компьютерах) уже около десяти лет строит промышленные модели, модели городов, а с недавних пор и модели мира⁴. Последние предсказывают, что коллапс современного индустриального мира произойдёт между 2030 и 2060 годами почти независимо от мер, которые могут быть приняты сегодня («*Technology Review*», январь 1971 г., опубликовано Массачусетским технологическим институтом). Его модель состоит из «спекулятивных» (разумных – *vernünftigen*) предположений о взаимодействии различных факторов. Возникает вопрос: насколько выводы Форрестера убедительны? При современном состоянии теории математических моделей трудно либо подтвердить, либо отвергнуть модели Форрестера. В отличие от моделей мира, модели биологических систем гораздо лучше поддаются экспериментальной проверке, на них лучше разрабатывается модельная методология, чем на мировых и экономических моделях.

В Беркли мы старательно работаем над вопросами подгонки моделей к данным, особенно для тех из них, которые могут быть выражены в форме нелинейных систем дифференциальных уравнений. Это также поднимает интересные математические вопросы, особенно об алгоритмах, таких, как алгоритмы оптимизации и алгоритмы решения систем алгебраических уравнений. В частности, вновь и вновь возникает вопрос об абсолютном минимуме требований к вычислительной работе при решении специальных

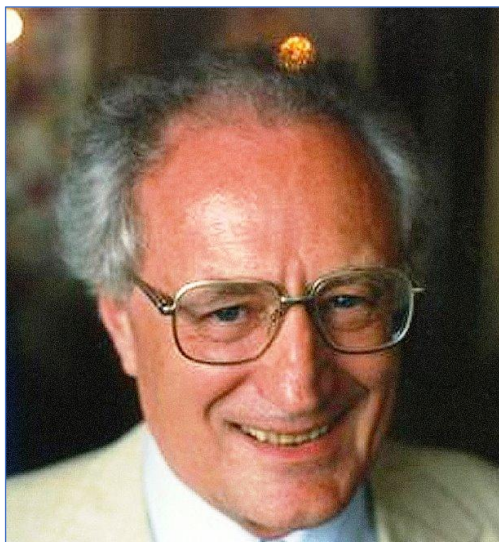
² Курт Фридрих Гёдель (Kurt Friedrich Gödel; 1906-1978) – австрийский логик, математик, философ науки; считается одним из наиболее выдающихся мыслителей XX века (Клайн, 1984). Наиболее известен сформулированными и доказанными им «теоремами о неполноте», которые оказали большое влияние на представление об основаниях математики. Член Национальной академии наук США (1955), иностранный член Лондонского королевского общества (1968). – *Все сноски – примечания переводчиков.*

³ Гордонские конференции – международные научно-практические конференции, которые проводятся с 1931 г. Для проведения конференций часто выбираются живописные и изолированные места, чтобы активизировать атмосферу неформального общения; устные дискуссии запрещено цитировать, для поощрения свободного обсуждения, часто неопубликованных исследований. Темы Конференций можно найти в журнале "Science" (см., например, (Gordon Research., 2010)).

⁴ Джей Райт Форрестер (Jay Wright Forrester; 1918-2016) – американский инженер, системолог, разработчик теории системной динамики. Член Национальной инженерной академии США (1967). Речь идет о работах 1958-1971 гг. (Форрестер, 1971, 1974, 2003).

задач с помощью алгоритмов. Ещё одна чрезвычайно интересная область – модели нервных сетей и моделирование функций мозга с помощью алгоритмов (например, «распознавание образов»).

Прежде всего, несколько слов об авторе этой заметки.



Ганс-Иоахим Бремерманн (Hans-Joachim Bremermann; ГИБ) родился в Бремене (Германия), в 1926 г. Получение образования для него было нелёгким, так как оно, фактически, началось только после Второй мировой войны, когда жизнь стала возвращаться в более-менее нормальное русло. В 1951 г. в университете Мюнстера (Münster; земля Северный Рейн-Вестфалия) он защищает диссертацию на тему “Die Charakterisierung von Regularitätsgebieten durch pseudokonvexe Funktionen” – «Характеристика областей регулярности псевдовыпуклыми функциями». Суть этой работы (для дилетантов) состоит в доказательстве (частного случая) предположения Э. Леви⁵ (Levi, 1910) из области комплексного анализа, который, например, используется для описания динамики квантовой системы уравнением Шрёдингера (Шабат, 1976).

В течение года после присуждения ему докторской степени ГИБ оставался в Мюнстере и преподавал там в качестве ассистента. В 1952 г. он отправился в США, где занимал должность научного сотрудника в Стэнфордском

Есть надежда, что развитие теории математического моделирования обогатит как математику, так и биологию.

университете, а затем, в 1953 г., был назначен научным сотрудником в Гарвардском университете. В это время он продолжал получать высококачественные результаты в комплексном анализе, развивая результаты своей диссертации.

16 мая 1954 г. ГИБ женился на испанке Марии Изабель Лопес Перес-Охеде (Maria Isabel Lopez Perez-Ojeda; 1931-2015)⁶, исследовательнице романского языка и литературы. Он вернулся в Мюнстер на учебный год 1954-1955; затем, вновь США – в Принстоне, Сиэтле, снова в Принстоне (1958-1959; но уже как физик – он применил свои знания в области комплексного анализа для работы над квантовой теорией поля). В 1959 г. ГИБ принял назначение на должность доцента математики в Калифорнийском университете, где и трудился до конца своей карьеры, занимая кафедры по математике и биофизике и получив звание полного профессора в 1966 г. В это время его интересы обратились к теории сложности и эволюционной биологии. В 1978 г. он прочитал серию лекций «Что делают физики» (в университете штата Сонома), обсуждая физические ограничения математического понимания физических и биологических систем. Он продолжал работать в области математической биологии, разрабатывая математические модели динамики паразитов и болезней, нейронных сетей, а также патологии СПИ-Да. Он вышел на пенсию в 1991 г. Скончался от рака в 1996 г.

ГИБ продолжал развивать математическое моделирование как инструмент для понимания сложных (особенно биологических) систем до конца своей жизни. «Его интеллектуальный путь был отмечен блестящей пронизательностью и дальновидностью. <...> Ганс Бремерманн запомнился не только своей гениальностью, но и своей теплотой, щедростью, мужеством, честностью, смиренностью и любовью» (Anderson, 1995, p. 9).

⁵ Эудженио Леви (Eugenio Elia Levi; 1883-1917) – итальянский математик, известным своим фундаментальным вкладом в теорию групп и теорию функций нескольких комплексных переменных. В 1910 г. Леви доказал, что каждая область голоморфности (domain of holomorphy) с достаточно гладкой границей является псевдовыпуклой областью. ГИБ доказал и обратное утверждение – каждая псевдовыпуклая область является областью голоморфности.

⁶ Интересна её судьба. Она родилась в Картахене (Cartagena; Мурсия, Испания), но детство и юность провела в Санта-Поле (Santa Pola; Валенсия, Испания). М. Перес-Охеда стала первой женщиной из Санта-Пола, которая получила степень в зарубежном университете – Калифорнийском государственном университете в Беркли (США) в 1960 г. Её именем назван проспект в Санта-Пола; её вилла Аделаида (большой особняк 1912 г. с окружающим его садом) по завещанию перешла в собственность муниципалитета и в марте 2016 г. стала Центром культуры и искусства.

Теперь несколько слов о том, насколько сбылись прогнозы Г.-И. Бремерманна по отношению к синтезу теории математического моделирования биосистем. Процесс познания, в известном смысле, – это моделирование; «любая гипотеза – это модель» (Гринченко, 2004, с. 52); афористично, но, в принципе, верно. Согласимся с ГИБ, что «даже если бы известные сейчас законы физики и химии были точными и полными (что сомнительно), поведение организмов не поддаётся столь лёгкому описанию, поскольку такое поведение является результатом очень сложных взаимодействий между сложными молекулами» (см. выше). Это связано с тем, что биологические (экологические) системы – это сложные системы, объекты системологии. Поэтому «эйфория физиков» 50-70-х годов по поводу объяснения биологических явлений на языке атомов и молекул (см., например, (Schrödinger, 1944; Мошков, 2019), да и замечание самого ГИБ о «сложных молекулах») была не обоснована. Правда, физико-химические методы позволили развить такие направления, как молекулярная биология и биохимия, но ответить на кардинальные вопросы поведения сложных параметров сложных систем они были не в состоянии.

А вот что касается методологии математического моделирования, которая по ГИБ (на тот момент) «в основном носит ситуативный характер и не продумана с научной точки зрения» – здесь есть определённые достижения. Пришло понимание того, что в силу многозначности понятия «модель» в науке и технике не существует единой классификации видов моделирования: классификацию можно проводить по характеру моделей, по характеру моделируемых объектов, по сферам приложения моделирования и т. д.

Таким образом, прежде всего, получила поддержку научного сообщества классификация методов моделирования (см., например, обзоры (Розенберг, 1984, 2013; Фурсова, Левич, 2002; Количественные методы..., 2005)). По методам математического моделирования различают эмпирико-статистические (классические регрессионные (Вараксин, 2006; Регрессионный анализ..., 2016) и самоорганизующиеся (Ивахненко, 1982; Ивахненко, Юрачковский, 1987)), аналитические (Свирижев, Логофет, 1978; Ризниченко, 2003) и имитационные модели (Шеннон, 1978)⁷. Имитационные модели можно разделить на классические (имитация первого ранга (Grassland Simu-

lation..., 1978; Горстко и др., 1984)) и квазиимитационные⁸ (имитация второго ранга; например, модели мировой глобальной динамики (Meadows et al., 1972; Преодолевая пределы..., 2023)).

При математическом моделировании сложных биологических (экологических) систем следует учитывать несколько принципов системологии.

- *Принцип множественности моделей В.В. Налимова* [1971]: для объяснения и предсказания структуры и (или) поведения сложной системы **возможно построение нескольких моделей**, имеющих одинаковое право на существование.
- *Принцип формирования законов*: постулируются осуществимые модели, а из них в виде теорем выводятся законы сложных систем. При этом законы касаются имеющих место или будущих естественных и искусственных систем. Они могут объяснить структуру и поведение первых и индуцировать построение вторых. Таким образом, **законы системологии носят дедуктивный характер, и никакие реальные явления не могут опровергнуть или подтвердить их справедливость**. Последнее утверждение следует понимать так (Флейшман, 1982, с. 21): несоответствие между экспериментом над реальной сложной системой и законом может свидетельствовать лишь о несоответствии реальной системы тому классу осуществимых моделей, для которых выведен закон; с другой стороны, соответствие эксперимента закону никак не связано с его подтверждением (он в этом не нуждается, будучи дедуктивным) и позволяет «оставаться» исследователю в рамках принятых при выводе закона допущений и гипотез.
- *Принцип рекуррентного объяснения: свойства систем данного уровня иерархической организации мира выводятся в виде теорем* (объясняются), исходя из постулируемых свойств элементов этой системы (т. е. систем непосредственно нижестоящего уровня иерархии) и связей между ними. Например, для вывода свойств экосистемы (биоценоза) постулируются свойства и связи популяций, которые формализуются математической моделью, для вывода свойств популяций – свойства и связи особей и т. д.
- *Принцип минимаксного построения моделей: теория должна состоять из простых моде-*

⁷ Библиография – огромна (см., например, (Количественные методы..., 2005)) и здесь очень субъективно названы лишь некоторые из обзорных работ, соответствующих классификационным единицам моделирования сложных систем.

⁸ Квазиимитационные модели отличаются от собственно имитационных моделей только тем, что при их построении не используется блочный принцип (эти модели «ушли» от аналитических, но не «пришли» к имитационным...).

лей (**min**) систем нарастающей сложности (**max**). Другими словами, формальная сложность модели (например, число описывающих её уравнений) не должна соответствовать неформальной сложности системы. Отсюда следует, что грубая модель динамики экосистемы может оказаться проще более точной модели более простой системы. Этот принцип рассматривается как аналог *принципа «бритвы Оккама»*⁹.

«Предлагается большое количество математических моделей, каждая из которых синтезирована на основе "правдоподобных" предположений и упрощений. Однако в целом отсутствует методология адаптации и проверки моделей на экспериментальных данных». В этой цитате ГИБ можно увидеть еще одну особенность математического моделирования сложных систем – это попытка совместить в рамках одной модели *объяснительную и предсказательную функции* теории. При этом соотношение объяснения и прогнозирования при системном исследовании сложных экологических объектов практически всегда вызывает дискуссии и часто недопонимание у экологов-практиков. Аналитическим моделям «приписываются» функции прогнозирования, а имитационным – объяснения. В этом контексте очень симптоматично высказывание Э. Майра¹⁰ (1970, с. 54): «Теория может предсказывать в той же степени, в какой она может описывать или объяснять». Это утверждение ясно свидетельствует о том, что его автор – физик, ибо ни один биолог не отважился бы на такое заявление. <...> Один из самых существенных вкладов эволюционной теории в философию состоял в том, что она продемонстрировала независимость объяснения от предсказания». При исследовании простых систем (например, в классической физике) функции объяснения и предсказания совмещаются в рамках одного закона. Так, одним из явлений, которые получили объяснение в законе всемирного тяготения Исаака Ньютона, было явление приливов и отливов на Земле, а предсказанием – анализ движения Луны, связанный с падением тел на Землю. Для сложных свойств сложных систем нельзя ожи-

дать аналогичного успеха: одна модель (один закон) будет не в состоянии одновременно удовлетворительно выполнять как объяснительную, так и предсказательную функции (Флейшман, 1982; Розенберг, 1984, 2013). Только один пример.

Так, Э. Ной-Меир¹¹ (Noy-Meir, 1975) построил простую аналитическую модель сезонного роста общей фитомассы растительного сообщества, используемого в качестве пастбища:

$$dy/dt = G(y) - C(y) ,$$

где dy/dt – скорость накопления фитомассы y ; $G(y)$ – скорость роста этой фитомассы (описывается логистической кривой); $C(y)$ – скорость её поедания консументами (задается *функцией с насыщением Михаэлиса–Ментен*). Таким образом, эта модель представляет собой простое балансовое соотношение, и её анализ позволяет объяснить ряд наблюдаемых эффектов (например, поедаемость фитомассы только до некоторых пределов, влияние плотности животных на пастбище на устойчивость этой системы и пр.). Модель очень проста и позволяет легко проследить причинно-следственные связи элементов системы, т. е. получить удовлетворительное объяснение её функционирования через малое число достаточно правдоподобных гипотез.

Прогностические способности модели Ной-Меира, даже при весьма точном определении её коэффициентов (хотя среди них есть такие, «подобраться» к которым очень сложно – например, максимальная скорость потребления фитомассы животными), будут низкими. Очевидность этого вытекает из факта сознательного упрощения данной экосистемы с тем, чтобы объяснить взаимодействие в подсистеме «растительное сообщество – травоядные животные» (не учитывается влияние на растительность факторов окружающей среды, погодных условий, хозяйственной деятельности человека и т. д.). Учет новых факторов значительно усложнит модель и переведет её в ранг имитации (см., в частности, имитационную модель растительности, используемой под пастбище (Goodall, 1967)), которая обладает хорошей прогностической способностью, но по которой сложно (или даже невозможно) проследить причинно-следственные связи с целью объяснения, в силу сложности самой модели.

⁹ Принцип «бритвы Оккама», известный в науке так же, как принцип бережливости, принцип простоты или принцип лаконичности мышления был сформулирован в XIV в. английским философом-схоластом Уильямом Оккамом (Ockham или Occam William; ок. 1285-1349) в следующем виде: *frustra fit plura, quod fieri potest pauciora* – не следует делать посредством большего то, что можно достичь посредством меньшего.

¹⁰ Эрнст Вальтер Майр (Ernst Walter Mayr, 1904-2005) – немецко-американский биолог; член Национальной АН США (1954), иностранный член Лондонского королевского общества (1988), Французской АН (1989).

¹¹ Эммануил Ной-Меир (Immanuel Noy-Meir; 1941-2009) – израильский фитоценолог, эколог.

Завершим эту мысль небольшой, но очень «наглядной» цитатой из «Фауста» В. Гёте (1947, с. 119):

*Иль вот: живой предмет, желая изучить,
Чтоб ясное о нем познание получить, –
Ученый прежде душу изгоняет,
Затем предмет на части расчленяет
И видит их, да жаль: духовная их связь
Тем временем исчезла, унеслась!..*

Последний интересный тезис статьи ГИБ: «Ещё одна чрезвычайно интересная область – модели нервных сетей и моделирование функций мозга с помощью алгоритмов (например, "распознавание образов")». История современных моделей нейронных сетей началась даже несколько раньше статьи ГИБ – в середине 50-х годов, когда Ф. Розенблатт¹² придумал модель перцептрона (Rosenblatt, 1962) и заявил, что эта модель способна решить все проблемы теории искусственного интеллекта. В 1964 г. наши соотечественники В.Н. Вапник и А.Я. Червоненкис¹³ создали первую математическую теорию (известна как теория VC), которая объяснила, почему нейронные сети могут успешно работать в процессе обучения (обосновала принцип минимизации эмпирического риска (Вапник, Червоненкис, 1974)). В экологических (фитоценологических) исследованиях распознавание образов начало применяться с начала 70-х годов (Розенберг и др., 1972; Розенберг, 1984, 2013, 2017; Корженевский, Розенберг, 1986). Можно констатировать, что, хотя эти разработки не получили пока широкого распространения в экологии, однако они используются и демонстрируют неплохую индикационную способность.

Идеологической основой современной технологической цивилизации является научная идеология, или *сциентизм* (англ. *science*). Эта идеология основана на вере в существование небольшого числа точно формулируемых законов природы, на основе которых всё в природе предсказуемо и манипулируемо. Природа рассматривается как гигантская машина, которой можно управлять, если известен принцип её функционирования. Эта научная идеология, как заметил еще Э. Мах¹⁴, часто играет роль «религии технологической цивилизации» (см.: [Шафаревич, 1993]). Её основная догма – это вера в математизацию.

¹² Фрэнк Розенблатт (Frank Rosenblatt, 1928-1971) – американский психолог, нейрофизиолог, специалист по искусственному интеллекту.

¹³ Владимир Наумович Вапник (г. р. 1936) – советский, американский математик.

Алексей Яковлевич Червоненкис (1938-2014) – советский, российский учёный в области информатики.

¹⁴ Эрнст Мах (Ernst Mach; 1838-1916) – австрийский физик, механик и философ-позитивист; член Венской Императорской АН (1880).

Она (догма) утверждает, что всё (или, по крайней мере, всё существенное) в природе может быть измерено, превращено в числа или другие математические объекты, и что путем совершения над ними различных математических манипуляций можно предсказать и подчинить своей воле все явления природы и общества. Эта вера содержится уже в призыве Г. Галилея¹⁵ «Измерить всё, что измеримо, и сделать измеримым то, что неизмеримо», И. Кант¹⁶ говорил, что каждая область сознания является наукой настолько, насколько в ней содержится математики, А. Пуанкаре¹⁷ писал, что окончательная, идеальная фаза развития любой научной концепции – это её математизация. Не только философы, но и «конкретные» специалисты подчеркивали важность математизации «своего направления» в науке (например, гидробиолог Г.Г. Винберг¹⁸ (1981, с. 5) писал, что «современные экологические исследования невозможны без использования результатов экспериментальных эколого-физиологических работ и применения количественных [математических] методов»). В некотором смысле можно говорить о том, что мы живем в математической цивилизации – и, может быть, умираем вместе с нею (Шафаревич, 1993; Шитиков и др., 2005). Но при всём этом не будем забывать и то, что «в научной идеологии математизация играет ту же роль, что стандартизация в технике. Простейший путь применения математики – это счёт. Но считать можно только однородные объекты. Пусть нам даны, скажем, яблоко, цветок, собака, дом, солдат, девушка, луна. Мы можем сосчитать их и сказать, что их 7 – но 7 чего? Единственный ответ – 7 предметов. Различия между собакой и луной, между яблоком и солдатом исчезают: они все потеряли свою индивидуальность и превратились в лишённые признаков «предметы». Счёт убивает индивидуальность. Это самый примитивный пример, но во всех случаях присутствует тот же принцип» (Шафаревич, 1993; выделено нами. – Авторы).

Завершая эти комментарии к переводу статьи Г.-И. Бремерманна, еще раз отметим, что он был

¹⁵ Галилео Галилей (Galileo Galilei; 1564-1642) – итальянский физик, механик, астроном, философ, математик.

¹⁶ Иммануил Кант (Immanuel Kant; 1724-1804) – немецкий философ, один из центральных мыслителей эпохи Просвещения.

¹⁷ Жюль Анри Пуанкаре (Jules Henri Poincaré; 1854-1912) – французский математик, физик, астроном, философ; президент Парижской АН (1906), член Французской академии (1908) и ещё более 30 академий мира, в т. ч. иностранный чл.-корр. ИСПАН (1895).

¹⁸ Георгий Георгиевич Винберг (1905-1987) – советский гидробиолог, чл.-корр. АН СССР, президент Всесоюзного гидробиологического общества (1971-1986).

одним из первых создателей генетических алгоритмов, компьютерных программ, которые развиваются или изменяются подобно дарвиновской эволюции. Однако спрогнозировать развитие методологии математического моделирования био-

логических (экологических) систем в полной мере ему не удалось. И эта его статья сегодня представляет, в большей степени, исторический интерес.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список русскоязычной литературы

Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. Теория распознавания образов (статистические проблемы обучения). М.: Наука, 1974. 416 с.

Вараксин А.Н. Статистические модели регрессионного типа в экологии и медицине. Екатеринбург: Голицкий, 2006. 255 с.

Винберг Г.Г. Многообразие и единство жизненных явлений и количественные методы в биологии // Журн. общ. биол. 1981. Т. 42. № 1. С. 5-18.

Гёте И.В. Фауст. Трагедия. 1 и 2 части / Пер. Н.А. Холодковского // Собрание сочинений. М.: ГИХЛ, 1947. Т. 5. 590 с.

Горстко А.Б., Домбровский Ю.А., Сурков Ф.А. Модели управления эколого-экономическими системами. М.: Наука, 1984. 119 с.

Гринченко С.Н. Системная память живого (как основа его метаэволюции и периодической структуры) = System memory of life (as the basis of its metaevolution and periodic structure). М.: ИПИ РАН; Мир, 2004. 512 с.

Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев: Наук. думка, 1982. 296 с.

Ивахненко А.Г., Юрачковский Ю.П. Моделирование сложных систем по экспериментальным данным. М.: Радио и связь, 1987. 120 с. (Сер. «Кибернетика»).

Клайн М. Математика. Утрата определённости. М.: Мир, 1984. 446 с.

Количественные методы экологии и гидробиологии: (сб. науч. тр., посвящ. памяти А.И. Баканова). Тольятти: ИЭВБ РАН; ИБВВ РАН, 2005. 404 с.

Корженевский В.В., Розенберг Г.С. Использование методов распознавания образов для индикации химических элементов почвы по растительности (на укр. яз.) // Укр. бот. журн. 1986. Т. 43, № 2. С. 62-65.

Майр Э. Причина и следствие в биологии // На пути к теоретической биологии. I. Прологомены. М.: Мир, 1970. С. 47-58.

Мошков К.А. 75 лет вопросу Шрёдингера «What is life?» // Троицкий вариант. 2019. № 9. С. 3.

Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, 1971. 207 с.

Преодолевая пределы роста. Основные положения доклада для Римского клуба / под ред. В.А. Садовниченко. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2023. 99 с.

Регрессионный анализ в почвоведении: учеб. пособие / Е.В. Шеин, М.А. Мазиров, А.А. Корчагин и др. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2016. 88 с.

Ризниченко Г.Ю. Математические модели в биофизике и экологии. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 184 с.

Розенберг Г.С. Введение в теоретическую экологию / В 2-х т. Тольятти: Кассандра, 2013. Т. 1. 565 с.; Т. 2. 445 с. URL: www.ievbras.ru/books/books.html (дата обращения: 01.03.2024).

Розенберг Г.С. Модели в фитоценологии. М.: Наука, 1984. 265 с.

Розенберг Г.С. Оценка длины обучающей последовательности в задаче распознавания образов (биоиндикация) // Онтология проектирования. 2017. Т. 7. № 2 (24). С. 207-215.

Розенберг Г.С., Миркин Б.М., Рудерман С.Ю. Опыт приложения теории распознавания образов для оценки засоления почв по растительности // Экология. 1972. № 6. С. 31-34.

Свирижев Ю.М., Логофет Д.О. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука, 1978. 352 с.

Флейшман Б.С. Основы системологии. М.: Радио и связь, 1982. 368 с.

Форрестер Д. Динамика развития города = Urban Dynamics. М.: Прогресс, 1974. 286 с. (Forrester J.W. Urban Dynamics. Waltham (MA): Pegasus Communications, 1969. 285 p.).

Форрестер Д. Мировая динамика = World Dynamics. М.: АСТ, 2003. 384 с. (Forrester J.W. World Dynamics. Waltham (MA): Pegasus Communications, 1971. 144 p.).

Форрестер Д. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика). М.: Прогресс, 1971. 340 с. (Forrester J.W. Industrial Dynamics. Waltham (MA): Pegasus Communications, 1961. 464 p.).

Фурсова П.В., Левич А.П. Математическое моделирование в экологии сообществ. Обзор литературы // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов (обзорная информация ВИНТИ). 2002. № 9. С. 2-97.

Шабат Б.В. Введение в комплексный анализ. В 2-х т. / Изд. 2-е. М.: Наука, 1976. Т. 1. 320 с.; Т. 2. 400 с.

Шафаревич И.Р. Доклад на собрании Японского математического общества от 28 сентября 1993 г. URL: www.doktor.ru/doctor/biometr/naukoved/mathem.htm (дата обращения: 15.05.2024).

Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. 424 с. (Shannon R.E. Systems simulation: the art and science. Englewood Cliffs (N. J.): Prentice-Hall, 1975. 387 p.).

Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения: в 2-х кн. М.: Наука, 2005. Кн. 1. 281 с.; Кн. 2. 337 с.

Общий список литературы / Reference List

- Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya.** Pattern Recognition Theory (Statistical Learning Problems). Moscow: Nauka, 1974. 416 p. (In Russian).
- Varaksin A.N.** Statistical Models of Regression Type in Ecology and Medicine. Yekaterinburg: Goshchitsky, 2006. 255 p. (In Russian).
- Vinberg G.G.** Diversity and unity of life tendencies and numerous methods in biology // Zhurn. obshch. biol. 1981. Vol. 42. No. 1. Pp. 5-18. (In Russian).
- Goethe I.V.** Faust. Tragedy. Parts 1 and 2 / Translated by N.A. Kholodkovsky // Collected Works. Moscow: GIHL, 1947. Vol. 5. 590 p. (In Russian).
- Gorstko A.B., Dombrovsky Yu.A., Surkov F.A.** Models of Ecological-Economic Systems. Moscow: Nauka, 1984. 119 p. (In Russian).
- Grinchenko S.N.** System Memory of Life (As the Basis of Its Metaevolution and Periodic Structure). Moscow: IPI RAS; Mir, 2004. 512 p. (In Russian).
- Ivakhnenko A.G.** Inductive Method of Self-Organization of Models of Slow-Moving Systems. Kiev: Nauk. Dumka, 1982. 296 p. (In Russian).
- Ivakhnenko A.G., Yurachkovsky Yu.P.** Modeling of Short-Lived Systems Based on Experimental Data. Moscow: Radio and Communications, 1987. 120 p. (Ser. "Cybernetics"). (In Russian).
- Kline M.** Mathematics. The Loss of Certainty. Moscow: Mir, 1984. 446 p. (In Russian).
- Korzhenevsky V.V., Rozenberg G.S.** Using Pattern Recognition Methods for Indicating Chemical Elements of Soil Based on Vegetation (in Ukrainian) // Ukrainian Bot. Jour. 1986. Vol. 43. No. 2. P. 62-65. (In Russian).
- Popular Methods of Ecology and Hydrobiology: (Collection of Scientific Papers Dedicated to the Memory of A.I. Bakanov. Tolyatti: IEVB RAS; IBVV RAS, 2005. 404 p. (In Russian).
- Mayr E.** Causes and Research in Biology // On the Way to Theoretical Biology. I. Prolegomena. Moscow: Mir, 1970. Pp. 47-58. (In Russian).
- Moshkov K.A.** 75 Years of Schrödinger's Question "What is Life?" // Troitsky Variant. 2019. No. 9. P. 3. (In Russian).
- Nalimov V.V.** Theoretical Experience. Moscow: Nauka, 1971. 207 p. (In Russian).
- Overcoming the Direction of Growth. Main Provisions of the Report for the Club of Rome / edited by V.A. Sadovnichy. M.: Moscow Univ. Publ. House, 2023. 99 p. (In Russian).
- Regression analysis in local economy: textbook / E.V. Shein, M.A. Mazirov, A.A. Korchagin, and Dr. Vladimir: VISU Publishing House, 2016. 88 p. (In Russian).
- Riznichenko G.Yu.** Mathematical models in biophysics and ecology. Moscow; Izhevsk: Institute of Informatics, 2003. 184 p. (In Russian).
- Rozenberg G.S.** Views in theoretical ecology / In 2 vol. Tolyatti: Kassandra, 2013. Vol. 1. 565 p.; Vol. 2. 445 p. URL: www.ievbras.ru/books/books.html (accessed: 01.03.2024). (In Russian).
- Rozenberg G.S.** Models in Phytocenology. Moscow: Nauka, 1984. 265 p. (In Russian).
- Rozenberg G.S.** Estimating the length of the training sequence in the problem of pattern recognition (bioindication) // Design Ontology. 2017. Vol. 7. No. 2 (24). P. 207-215. (In Russian).
- Rozenberg G.S., Mirkin B.M., Ruderman S.Yu.** Experience of application of pattern recognition theory for assessing soil salinization based on vegetation // Ecology. 1972. No. 6. P. 31-34. (In Russian).
- Svirezhev Yu.M., Logofet D.O.** Using biological sciences. Moscow: Nauka, 1978. 352 p. (In Russian).
- Fleishman B.S.** Fundamentals of Systemology. Moscow: Radio and communication, 1982. 368 p. (In Russian).
- Forrester J.W.** Urban Dynamics. Moscow: Progress, 1974. 286 p. (In Russian).
- Forrester J.W.** World Dynamics. Moscow: AST, 2003. 384 p. (In Russian).
- Forrester J.W.** Industrial Dynamics. Moscow: Progress, 1971. 340 p. (In Russian).
- Fursova P.V., Levich A.P.** Mathematical modeling in ecological communities. Literature Review // Problems of the Environment and the State of Resources (on Information (VINITD). 2002. No. 9. Pp. 2-97. (In Russian).
- Shabat B.V.** Verification in Complex Analysis. In 2 vol. / 2nd ed. Moscow: Nauka, 1976. Vol. 1. 320 p., Vol. 2. 400 p. (In Russian).
- Shafarevich I.R.** Recorded in the Japanese Mathematical System for 28 September 1993. URL: www.doktor.ru/doctor/biometr/naukoved/mathem.htm (accessed: 15.05.2024) (In Russian).
- Shannon R.** Modeling Simulation Systems: Art and Science. Moscow: Mir, 1978. 424 p. (In Russian).
- Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D.** Quantitative Hydroecology: Methods, Criterion, Solutions: in 2 books. Moscow: Nauka, 2005. Book 1. 281 p.; Book 2. 337 p. (In Russian).
- Anderson R.** Biological and evolutionary information processing: A festschrift for Hans J. Bremermann // Biosystems. 1995. Vol. 34. No. 1-3. P. 1-10.
- Goodall D.W.** Computer simulation of changes in vegetation subject to grazing // J. Ind. Bot. Soc. 1967. Vol. 46. No. 4. P. 356-362.
- Gordon Research Conferences // Science. 2010. Vol. 327. No. 5966. P. 708-734. Grassland Simulation Model / Ed. by G.S. Innis. N. Y. etc.: Springer-Verlag, 1978. 298 p. (Ser.: Ecological Studies. Vol. 26).
- Levi E.E.** Studii sui punti singolari essenziali delle funzioni analitiche di due o più variabili complesse [Studies on essential singular points of analytic functions of two or more complex variables] // Annali di Matematica Pura ed Applicata. 1910. Vol. XVII. No. 1. P. 61-87.
- Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens III W. W.** The Limits to Growth. A report for the Club of Rome's on the predicament of Mankind. N. Y.: Universe Books, 1972. [рус. перевод: Медоуз Д. и др. Пределы роста. Доклад по проекту «Сложное положение человечества». М.: МГУ, 1991. 206 с.]. URL: archive.org/details/TheLimitsToGrowth/page/n23/mode/2up (accessed: 01.03.2024).
- Noy-Meir I.** Stability of grazing systems: an application of predator-prey graphs // J. Ecol. 1975. Vol. 63. No. 2. P. 459-481.
- Rosenblatt F.** Principles of Neurodynamic: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms. Wash-

ington (DC): Spartan Books, 1962. 616 p. (Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики: Перцептроны и теория механизмов мозга. М.: Мир, 1965. 480 с.).

Schrödinger E. What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge (England): Univ. Press, 1944.

91 p. (Шрёдингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. М.: Атомиздат, 1972. 88 с.; Шрёдингер Э. Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. М.; Ижевск, 2002. 92 с.).

MODELLING OF BIOSYSTEMS BY H. BREMERMAN WITH COMMENTS

(Hans-J. Bremermann von. Mathematische Modelle von biologischen Systemen // Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg. 1971. V. 60. S. 112–113).

G.S. Rozenberg, N.V. Kostina, A.G. Rozenberg

Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, Tolyatti (Russia)

Abstract. This translation discusses an article by German-American biophysicist Hans Bremerman on the problems of mathematical modelling of biological systems. Some decisive problems that have been solved over the past 50 years are considered.

Key words: ecosystem, evolution, principles, laws, methodology, theory