

IN VIVO – IN VITRO – IN SILICO* В ЭКОЛОГИИ*Г.С. Розенберг**

Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, Россия

Эл. почта: genarozenberg@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.07.2015; принята к печати 18.08.2015

Обсуждается использование подхода *in silico* (компьютерного) в экологии для работы с эмпирико-статистическими, самоорганизующимися, имитационными и аналитическими моделями. Обсуждены особенности оценки адекватности математических моделей в экологии. Обоснован комплексный подход к моделированию («модельный шторм»).

Ключевые слова: математическое моделирование, эмпирико-статистические модели, самоорганизующиеся модели, имитационные модели, аналитические модели.

IN VIVO – IN VITRO – IN SILICO* IN ECOLOGY*G.S. Rozenberg**

Institute of Ecology of the Volga River Basin of the Russian Academy of Science, Togliatti, Russia

E-mail: genarozenberg@yandex.ru

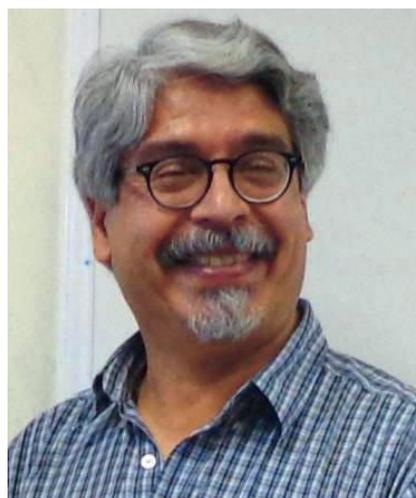
The *in silico* (computer-assisted) approach in ecology to empirical-statistical, self-organized, simulation, and analytical models is discussed. The distinctive features of assessing the adequacy of mathematical models in ecology are discussed. The use of an integrated modeling approach (“model storm”) is justified.

Keywords: mathematical modeling, empirical-statistical models, self-organizing models, simulation models, analytical models.

Введение

Биологи давно привыкли к «латинизированным» выражениям типа *ex vivo* (вне жизни), *in situ* (на месте), *in utero* (в утробе), *in papyro* (на бумаге), *in vivo* (в живом организме) или *in vitro* (в пробирке, в стекле). В последнее время все более активно (особенно в молекулярной биологии) используется понятие *in silico* («в кремнии» – важнейшем элементе в составе материалов для изготовления вычислительной техники), которое обозначает компьютерное моделирование (симуляцию) биологического эксперимента (в чем-то близко к *in papyro* – аналитически?). Фраза была создана по аналогии с *in vivo* и *in vitro* (и особенно *in papyro*) и сама не является латинской [16]. Введена в научный оборот она была в 1989 г. на семинаре «Cellular Automata: Theory and Applications» в Лос-Аламосе (Нью-Мексико, США) математиком из Национального автономного мексиканского университета (National Autonomous University of Mexico [UNAM]) П. Мирамонтесом, который представил доклад «DNA and RNA Physicochemical Constraints, Cellular Automata and Molecular Evolution», впоследствии легший в основу его докторской диссертации [42]. Первая научная статья, в которой было использовано это выражение, принадлежит перу французских исследователей [38]; первое упоминание в книге принадлежит Г. Сибургу [44] в главе, основанной на докладе, прочитанном на летней школе по Комплексным системам в Институте Санта-Фе (Нью-Мексико, США) в 1990 г. С 1998 г. издается журнал *In silico Biology (ISB) (Journal of Biological Systems Modeling and Simulation)*.

Для экологии начала третьего тысячелетия характерна общая тенденция к математизации научного исследования и широкому применению методов системного анализа. Правда, экология все еще остается той областью знания, в которой пока более целесообразно опираться на объяснение и прогноз опытной практикой, чем на теоретико-математические



Педро Мирамонтес
Pedro Eduardo Miramontes Vidal
(год рождения 1954)

предсказания. А потому все еще справедливы слова, сказанные почти столетия тому назад одним из ведущих американских экологов, сформировавшим современный образ науки «экологии», Р. Макинтошем: «талантливая догадка еще долго будет одним из основных стимулов науки» [41, р. 330]. Это связано и с принципиальной сложностью самих экологических систем как объектов математического моделирования, и с постоянно совершенствующейся методологией и методикой математического моделирования, и с огромным и все время растущим числом моделей разнообразных экосистем, и с целым рядом организационных трудностей, возникающих при постановке системного исследования, и пр.

В процессе познания окружающего мира любая научная дисциплина проходит три основных этапа своего развития: *описательный* (можно сказать, инвентаризационный), *концептуально-теоретический*

(при котором происходит выдвигание всякого рода представлений о структуре и характере функционирования исследуемых систем) и этап *математизации* этих представлений (то есть их формализация на наиболее точном и строгом на сегодняшний день языке математики). С этой точки зрения экология – не исключение: эколог хочет знать, какие экосистемы его окружают, сколько их, как они устроены и функционируют, как экосистема ограничена в пространстве, каковы пути конструирования искусственных экосистем с заданными свойствами, как управлять продуктивностью экосистем с максимальной выгодой и т. д. Из перечисленных трех этапов развития экологии как научной дисциплины можно считать, что первый – инвентаризационный – в основном завершен (но это слишком сильное утверждение, так как количество экосистем огромно, и можно говорить лишь об относительной изученности), второй – концептуально-теоретический – находится в стадии расцвета, а вот третий – формально-теоретический – переживает только свое становление. И здесь представления *in silico* вполне могут оказаться полезными.

Желание придать экологическим исследованиям строго теоретический характер проявилось достаточно давно. И это сказалось не только в попытках более полно и точно определить основные понятия экологии, такие как «экосистема», «сообщество», «биогеоценоз», «ассоциация», «синузия», «климакс» и пр. Правда, «теоретическая экология» все еще понимается весьма односторонне (концептуально-теоретически) и в этом виде не может претендовать на роль действительно теоретической дисциплины, способной обобщить содержание отдельных ее разделов с тем, чтобы эмпирически найденные для них закономерности получили дедуктивное обоснование и логически выводились из основных принципов, заложенных в основу теории. Объяснение этому можно найти в «Диалектике природы» Ф. Энгельса [37, с. 366]: «Дело в том, что всякому, кто занимается теоретическими вопросами, результаты современного естествознания навязываются с такой же принудительностью, с какой современные естествоиспытатели – желают ли они этого или нет – вынуждены приходить к общетеоретическим выводам. И здесь происходит известная компенсация. Если теоретики являются полузайками в области естествознания, то современные естествоиспытатели фактически в такой же мере являются полузайками в области теории...»

Любая теория – это, в сущности, идея, воплощаемая в моделях. За время своего существования экология накопила огромное количество экспериментальных фактов и стала остро нуждаться в обобщающих теориях [21, 29], способных объединить и сгруппировать эти отдельные факты с тем, чтобы направленно задавать Природе новые вопросы о сущности тех или иных экологических явлений.

Экстенсивные и интенсивные методы в экологии

Экстенсивный подход (лат. *extensivus* – расширяющий, удлиняющий, направленный не вглубь, а вширь) чаще всего связан с количественным, а не качественным изменением, увеличением; интенсивный подход (лат. *intensio* – напряжение, усиление) – напряженный, сосредоточенный, обладающий внутренним запасом сил. Математическое моделирование как

расширение методов исследования сложных систем [26–28] никоим образом не противопоставляется экстенсивным и интенсивным экологическим исследованиям: «количественному изучению растительности (в широком плане, экосистем. – Г. Р.) обязательно должно предшествовать ее качественное исследование» [17, с. 8].

На языке «математического моделирования в экологии» (*in silico*) традиционные экстенсивные методы (*in vivo* и *in vitro*) являются «поставщиками» информации не только для создания разного рода моделей в рамках эмпирико-статистического, самоорганизующегося и имитационного моделирования, но и способствуют выдвиганию гипотез о характере функционирования моделируемых систем и проверке работоспособности построенных моделей; интенсивные (*in papyro*) – для аналитических моделей [19–21, 29].

Сразу замечу, что понятия «экстенсивные» и «интенсивные» по отношению к методам чаще используются в сельском хозяйстве (например, увеличение количества продукции или только за счет расширения посевных площадей – «подъем целины», или за счет разработки и применения новых технологий в обработке земли и выведении новых, более урожайных сортов на той же площади [10]), в экономике (например, экстенсивное улучшение использования основных фондов или через увеличение времени работы действующего оборудования, или через сокращение простоев, повышение качества ремонтного обслуживания, своевременное обеспечение основного производства рабочей силой, сырьем, топливом, полуфабрикатами и пр.; интенсивное улучшение использования основных фондов предполагает повышение степени загрузки оборудования в единицу времени – за счет модернизации действующих машин и механизмов, установление оптимального режима их работы и пр.), в медицине (экстенсивная и интенсивная терапия) и значительно реже – в экологии. С этой точки зрения, возможно, понятие *in silico* ждет более счастливая судьба.

О «моделях» и «моделировании»

Несколько слов о «моделях», «моделировании» вообще и «математическом моделировании» в частности (хотя таких слов, как мне представляется, сказано уже немало; весьма субъективно назову некоторые их источники, относящиеся к экологии: [8, 18, 21, 29, 32, 35]).

Традиционно под «моделью» понимают некоторый опытный материальный или мысленно представляемый объект или явление, замещающий оригинальный объект или явление, который сохраняет только некоторые важные его (оригинального объекта или явления) свойства. Ю.А. Гастев [7, с. 14] писал: «...в современном научном обиходе нет, пожалуй, более употребительного термина, чем слово “модель”. И при всем разнообразии и пестроте способов употребления этого термина во всех оттенках вкладываемого в него смысла легко прослеживаются общие этимологические источники: французское *modèle* происходит (через итальянское *modello*?) от латинского *modus* (образец). С другой стороны, различные научные дисциплины и их комплексы настолько резко отличаются друг от друга по своему предмету и методам, что действительно общим, скажем, для ес-

тествознания и социологии, математики и искусствоведения, геологии и семиотики, физиологии и сопротивления материалов остается разве лишь единое представление о научном методе, с которым связывается убеждение в объективности предлагаемого данной научной теорией фрагмента картины Мира». Тогда «моделирование» – исследование объектов познания на их моделях; построение и изучение моделей реально существующих предметов, процессов или явлений с целью получения объяснений этих явлений, а также для предсказания явлений, интересующих исследователя. «Математическое моделирование» – процесс построения и изучения математических моделей.

Следует отметить, что построение математической модели предполагает наличие особой «идеологии», которой и посвящена эта статья.

Кроме математического, различают еще ряд подходов к моделированию:

- *аналоговое моделирование* – построение вспомогательной по отношению к исследуемому объекту системы, которая имеет иную физическую природу, но тождественна исходному объекту по описывающим его количественным закономерностям; в экологии, кажется, этот вид моделирования носит, скорее, исторический характер, хотя встречаются и современные работы [39, 43, 46];

- *производственное (исследовательское) моделирование* заключается в эксперименте над реальной экосистемой – например, опытные участки с некоторыми управляемыми параметрами (полив, удобрение и т. д.);

- *физическое моделирование* сводится к изучению системы или явления, воспроизводимых с сохранением их физической природы; необходимыми условиями такого рода моделирования являются сохранение подобия оригинала и модели, соответствующих масштабов для параметров исследуемых систем или

явлений (например, модельные деревья); этот метод менее универсален, чем математическое моделирование, однако в ряде случаев он достаточно эффективен при изучении сложных экосистем в ситуациях, когда относительно хорошо известны законы подобия модели и природы, выражающиеся через фундаментальные физические (химические, биологические) законы.

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.

Классификация методов математического моделирования экосистем

Целью любой классификации является группирование сходных объектов для обоснования общих методов исследования. В системологии [14, 22, 24–31, 35] классификация методов моделирования в определенной степени условна и предназначена не столько для описания сходства, сколько для выявления различий в подходах. Классификации методов моделирования осуществлялись неоднократно, однако они чаще всего проводились по форме (способу построения) и основывались либо на природе моделируемой системы, либо на способах моделирования. Предлагается оригинальная классификация методов моделирования (см. табл. 1), основанная на усложнении поведения изучаемых объектов [21, 29].

Наиболее распространенным в экологии является *эмпирико-статистическое моделирование* (ЭСМ; для этого класса используются также (как представляется, менее удачные) названия «статистическое» или «стохастическое» моделирование). Методы ЭСМ чрезвычайно разнообразны – от простейшей статистической обработки до регрессионного, факторного и кластерного анализов. Эти подходы должны «по-

Табл. 1

Соответствие систем и их моделей

Системы	Принципы усложняющегося поведения сложных систем [29, 34]	Состояния, вызывающие поведение сложных систем [1]	Модели
Простые системы	Вещественно-энергетический баланс (на основе законов сохранения)	Системы, сохраняющие состояние	Эмпирико-статистические модели; аналитические модели (законы); самоорганизующиеся модели (открытие законов)
	Гомеостазис (на основе обратных связей)	Системы поиска одного результата	
Сложные системы	без интеллекта	Выбор решений (на основе индуктивного поведения)	Эмпирико-статистические модели; аналитические модели (феноменологические модели и модели потенциальной эффективности сложных систем [34]); имитационные модели; самоорганизующиеся модели (открытие законов) [2]
		Перспективная активность	
	с интеллектом (суперсложные)	Рефлексия	

ставлять» первично обработанную информацию для построения других математических моделей. Замечу, что ЭСМ не позволяет вскрывать причинно-следственные связи моделируемых систем; построенные с помощью этих подходов модели служат только для проверки разного рода гипотез об этих связях.

Другим подходом, который также достаточно развит в экологии, является **имитационное моделирование (ИМ)**. Общеизвестного определения «имитационной модели» до сих пор не существует; разные исследователи вкладывают в это понятие различный смысл, акцентируя внимание на различных признаках моделей. Можно предложить такое определение ИМ [29]: *ИМ – это синтез имитационной модели «на пределе» наших знаний об объекте, реализованной на ЭВМ по блочному принципу*. ИМ в настоящее время продолжает оставаться одним из наиболее эффективных методов количественного прогнозирования поведения сложных экологических систем [2, 13, 29].

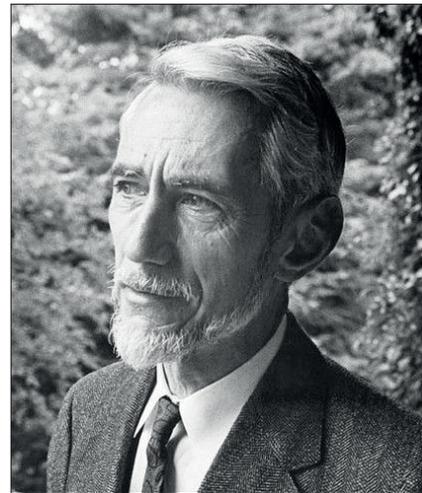
Алгоритмической реализацией **самоорганизующегося моделирования (СМ)** являются эволюционное моделирование [5] и метод группового учета аргументов (МГУА; [2, 11, 29]). СМ (в виде автоматов эволюционного моделирования или полиномов МГУА) не несет объяснительной функции и, так же как и ИМ, служит для прогнозирования поведения экосистем.

Наконец, **аналитические модели (АМ)** сложных систем в силу своей «упрощенности» (при их построении исследователь сознательно идет на выбор только самых существенных, с его точки зрения, элементов и связей между ними) выполняют только объяснительную функцию теории (при условии, что заложенные в их основу гипотезы справедливы и непротиворечивы). В основном аналитические модели реализуются без ЭВМ (можно сказать, что решения в этом случае получаются «на кончике пера») и позволяют создать качественную картину анализируемого экологического явления или экосистемы. Выделяют два типа АМ: феноменологические («эскизные»; например, классическая модель Лотки–Вольтерра системы «хищник–жертва») и модели потенциальной эффективности сложных систем [24, 25, 34]. Замечательным фактом теории потенциальной эффективности сложных систем [34] является то, что законы эффективности *любой* сложной системы могут быть выражены в единой форме. Эти модели носят оценочный характер, определяя некоторые «запреты» на конечные исходы.

Сравнение моделей, построенных разными способами [21, 29], позволяет определить области их применения и заставляет признать наиболее эффективным подходом тот, в котором все методы математического моделирования «почти на равных» участвуют в построении комплексной модели – процедура «модельного штурма» [2, 4, 29].

Адекватность математических моделей реальным экосистемам

Таким образом, математическое моделирование в экологии, выполняя функцию изучения *in silico*, позволяет с разной степенью подробности и точности описывать многообразие реальных экосистем и экологических процессов. Естественно, возникают вопросы: насколько «удачны» те или иные модели, что понимать под «качеством модели», и как оценить это «качество»?



Клод Шеннон
Claude Elwood Shannon
(1916–2001)

Прежде всего, необходимо еще раз подчеркнуть, что математической моделью сложной системы «нельзя объять необъятное», то есть ни одна математическая модель не несет одновременно всех функций теории изучаемого класса экологических систем. В этом смысле очень поучительна заметка К. Шеннона «The Bandwagon»¹ [45]. Вот цитата: «Сейчас теория информации (*можно говорить и о математическом моделировании в целом*. – Г. Р.), как модный опьяняющий напиток, кружит голову всем вокруг. Для всех, кто работает в области теории информации (*математического моделирования*. – Г. Р.), такая популярность несомненно приятна и стимулирует их работу, но в то же время и настораживает... Здание нашего несколько искусственно созданного благополучия слишком легко может рухнуть, как только в один прекрасный день окажется, что при помощи нескольких магических слов, таких как *информация, энтропия, избыточность*... нельзя решить всех нерешенных проблем... На понятия теории информации (*математического моделирования*. – Г. Р.) очень большой, даже, может быть, слишком большой спрос. Поэтому мы сейчас должны обратить особое внимание на то, чтобы исследовательская работа в нашей области велась на самом высоком научном уровне, который только возможно обеспечить». Таким образом, в практических ситуациях выбор той или иной математической модели (в силу принципа множественности моделей сложных систем) должен определяться целями исследования. Следовательно, математическая модель должна адекватно отражать не какую-то конкретную экосистему, а проблему, которая возникает при ее изучении.

Что касается самого термина «адекватность» (лат. *adaequatus* – приравненный), то его многозначность и размытость всякий раз требует комментариев при обсуждении свойств той или иной модели. В настоящее время имеется много исследований, посвященных вопросам оценки адекватности математических моделей изучаемым реальным сложным системам (назову лишь некоторые обзорные работы: [3, 21, 23, 29, 36]). Их анализ заставляет различать *гносеологические* и *праксеологические (прагматические)*

¹ Идиома: jump on the bandwagon – присоединиться к популярному делу или движению, присоединиться к большинству.

свойства моделей; в соответствии с этим, следует говорить о *собственно адекватности* (или о *качественной адекватности*, в смысле соответствия отображения в ней структуры и механизмов функционирования экосистем) и о *праксеологичности* модели (или о *количественной адекватности*, в смысле применимости модели для практических действий – прогнозирование, управление и пр.).

Тогда ЭСМ и СМ (типа «вход–выход») служат, в основном, целям прогнозирования и могут вообще не отражать ни структуры, ни механизмов функционирования экосистем и, следовательно, хотя и будут полезны для практики (в силу точности своих прогнозов), не будут адекватны реальным объектам в гносеологическом смысле. Поэтому для таких моделей целесообразно говорить только об их праксеологичности. Для АМ, напротив, нельзя говорить о праксеологичности, так как при их построении исследователь сознательно идет на ряд упрощений исходного объекта с тем, чтобы выделить наиболее важные (с его точки зрения) компоненты и связи; эти модели основаны в большей степени на априорной информации и призваны объяснять наблюдаемые в природе феномены. Поэтому для АМ имеет смысл говорить лишь о качественной адекватности. Наконец, обе «стороны» адекватности как общей характеристики моделирования проявляются в ИМ, где точность прогнозирования достигается за счет отображения в модели структуры и механизмов функционирования экосистем.

Критерии оценки собственно адекватности и праксеологичности математических моделей достаточно многочисленны, но их также можно разделить на два основных класса: *внутренние* и *внешние*. Если для оценки праксеологичности такое разделение достаточно очевидно: внутренние критерии основаны на той же информации, по которой строилась модель (метод наименьших квадратов), а внешние – на новой (МГУА), то для оценки качественной адекватности моделей провести подобное различие критериев более сложно. Например, можно считать внутренними критериями теоретические предпосылки самой экологии (модель роста популяции неадекватна, если она дает отрицательную численность или биомассу). Тогда внешние критерии следует искать в области математики и математического анализа моделей экосистем.

В частности, нельзя признать качественно адекватным объяснение случайности наблюдаемых колебаний численности некоторой популяции (в модельно описанной экосистеме), если в математическую модель ее роста непосредственно введен случайный фактор; другое дело, если такое квазислучайное поведение возникает при анализе детерминированной модели (странный аттрактор [29, т. 1, с. 464–465]).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для оценки как праксеологичности, так и собственно адекватности математических моделей экосистем приемлемое значение внутреннего критерия следует считать необходимым, а внешнего – достаточным условием на данном уровне знаний и в рамках имеющейся у естествоиспытателя информации.

Заключение

Моделирование – это интеллектуальный экзерсис (франц. *exercice*, от *exercer* – упражнять, развивать путем упражнений), реализация которого помогает достичь одну или несколько из перечисленных ниже целей [40]:

в процессе моделирования исследователь приходит к иному пониманию проблемы;

он более глубоко задумывается о наблюдаемых процессах и механизмах их взаимодействия;

происходит индуцирование им новых гипотез;

он способен лучше объяснить (или осуществить выбор между альтернативными объяснениями) полученную экспериментально информацию²;

модель может оказаться полезной для выбора тех или иных воздействий на реальную экосистему;

наконец, модель (правда, не очень часто) позволяет сделать достаточно осторожные прогнозы по характеру изменения структуры и динамики экосистем.

Таким образом, процесс создания может быть не менее эффективным, чем реализация и анализ самой модели (полное подтверждение знаменитого анекдота об ученом, для которого важнее всего – поиск). «Процесс столь же важен, как и продукт. Любой интеллектуально более короткий путь, такой как использование чьей-либо модели, без прохождения всего пути ее проектирования и создания, не только чреват скрытыми ловушками, но и предполагает потерянные возможности для исследователя проникнуть в суть сложной системы, которую он моделирует (*повысить свой интеллект. – Г. Р.*)» [40, р. 63]. Возвращаясь к проблеме «тиражирования» моделей, казалось бы, можно легко стать на позицию, согласно которой исследователь должен быть оригинален и не использовать «чужие» модели. Однако сравнение моделей [4, 29] дает серьезные основания и для иной точки зрения. Некоторая специализация и унификация в науке – полезны; использование уже накопленного опыта своих коллег позволяет сократить усилия по моделированию и время моделирования, избежать ряда ошибок, больше времени уделять собственно экологическим исследованиям и пр. Но за все в жизни надо платить, и в этой ситуации эколог-модельер должен «инвестировать» свое время в понимание модели. Эффективность этого процесса, естественно, зависит от исследований *in vivo*, *in vitro* и пр. (см. начало статьи), а вот моделирование (*in silico*) – полностью в руках (точнее, в голове) естествоиспытателя.

Благодарности. Автор благодарен многочисленным коллегам (особенно профессорам П.М. Брусиловскому, Б.М. Миркину, С.В. Саксонову, И.Ю. Усманову) за заинтересованное обсуждение этих проблем, а также благодарен РФФИ (гранты 14-04-01548 и 14-06-97019 р_поволжье_a), программе фундаментальных исследований Президиума РАН «Биоразнообразие природных систем» и программе Отделения биологических наук РАН «Рациональное использование биологических ресурсов России: фундаментальные основы управления» за финансовую поддержку данной работы.

² «...физика непонятное объясняет понятным образом через еще более непонятное. Все остальные области знаний поступают иначе – они пытаются объяснить непонятное через понятное, то есть через те фундаментальные представления о мироустройстве, которые возникли у человека в процессе антропогенеза» [15, с. 109].

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Акофф Р. О природе систем. Изв АН СССР Сер техн кибернетика. 1971;(3):68-75.
2. Беляев ВИ, Ивахненко АГ, Флейшман БС. Имитация, самоорганизация и потенциальная эффективность. Автоматика. 1979;(6):9-17.
3. Брусиловский ПМ, Розенберг ГС. Проверка неадекватности имитационной модели динамической системы с помощью алгоритмов МГУА. Автоматика. 1981;(6):43-8.
4. Брусиловский ПМ, Розенберг ГС. Модельный штурм при исследовании экологических систем. ЖОБ. 1983;44:254-62.
5. Букатова ИЛ. Эволюционное моделирование и его приложения. М.: Наука; 1979.
6. Виттих ВА. Парадигма ограниченной рациональности принятия решений: препринт. Самара: Институт проблем управления сложными системами РАН; 2009.
7. Гастев ЮА. Гомоморфизмы и модели (Логико-алгебраические аспекты моделирования). М.: Наука; 1975.
8. Гринин АС, Орехов НА, Новиков ВН. Математическое моделирование в экологии: Учебное пособие. М.: ЮНИТИ-Дана; 2003.
9. Еськов ВМ. Третья парадигма. Самара: Офорт; 2011.
10. Жученко АА. Биологизация и экологизация интенсификационных процессов в сельском хозяйстве. Вестн Орлов гос аграр ун-та. 2009;18(3):8-12.
11. Ивахненко АГ. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев: Техника; 1969.
12. Лефевр ВА. Конфликтующие структуры. М.: Советское Радио; 1973.
13. Меншуткин ВВ. Имитационное моделирование водных экологических систем. СПб.: Наука; 1993.
14. Миркин БМ, Розенберг ГС. Системный подход к фитоценологии. ЖОБ. 1978;39:167-78.
15. Налимов ВВ. Является ли знание научным в той степени, в какой оно математизировано? Биологический аспект проблемы. В кн.: Математизация современной науки: предпосылки, проблемы, перспективы. М.: АН СССР; 1986, с. 103-11.
16. Полянский А. In vivo – in vitro – in silico. Сайт «Биомолекула». 14 октября, 2004. <http://biomolecula.ru/content/16>.
17. Работнов ТА, Уранов АА. Предисловие к русскому изданию. В кн.: Грейг-Смит П. Количественная экология растений. М.: Мир; 1967, с. 5-11.
18. Ризниченко ГЮ. Математические модели в биофизике и экологии. Ижевск: Институт компьютерных исследований; 2003.
19. Розенберг ГС. Математическое моделирование фитоценологических систем // Бюл МОИП Отд биол. 1980;85(2):79-88.
20. Розенберг ГС. Математическое моделирование в экстенсивных и интенсивных геоботанических исследованиях (диссертация).

Тарту: Тартусский государственный университет; 1983.

21. Розенберг ГС. Модели в фитоценологии. М.: Наука; 1984.
22. Розенберг ГС. О системной экологии. ЖОБ. 1988;49:580-91.
23. Розенберг ГС. Адекватность математического моделирования экологических систем. Экология. 1989;(6):8-14.
24. Розенберг ГС. О моделях потенциальной эффективности экологических систем. Изв Самарского НЦ РАН. 2003;5:34-43.
25. Розенберг ГС. Модели потенциальной эффективности популяций и экологических систем. Вестн Нижегородского ун-та Сер биол. 2005;1(9):163-80.
26. Розенберг ГС. О путях построения теоретической экологии. Усп совр биол. 2005; 125(1):14-27.
27. Розенберг ГС. Системно-методологические проблемы современной экологии. В кн.: Количественные методы экологии и гидробиологии (сборник научных трудов, посвященный памяти А.И. Баканова). Тольятти: Самарский НЦ РАН; 2005, с. 22-36.
28. Розенберг ГС. Экология и системология: синтез теории. Биосфера. 2012;4:1-7.
29. Розенберг ГС. Введение в теоретическую экологию. Тольятти: Кассандра; 2013.
30. Розенберг ГС. Холизм + редукционизм: две дороги к Храму. Вестн РАН. 2014; 84(8):43-6.
31. Розенберг ГС, Кудинова ГЭ. Системный подход в исследовании эколого-экономических систем. В кн.: Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов (ELPIT 2003). Тольятти: Тольяттинский государственный университет; 2003, с. 17-22.
32. Тутубалин ВН, Барабашева ЮМ, Григорян АА и др. Математическое моделирование в экологии (Историко-методологический анализ). М.: Языки русской культуры; 1999.
33. Филимонов ВА. Кросс-технологии ситуационного центра – полигон кибернетики. Матем структуры и моделирование. 2014;3(31):87-98.
34. Флейшман БС. Основы системологии. М.: Радио и связь; 1982.
35. Флейшман БС, Брусиловский ПМ, Розенберг ГС. О методах математического моделирования сложных систем. В кн.: Системные исследования. Методологические проблемы. Ежегодник 1982. М.: Наука; 1982, с. 65-79.
36. Хеджпет ДВ. Модели в экологии и путаница вокруг них. Некоторые философские соображения. Биол моря. 1978;(6):3-15.
37. Энгельс Ф. Диалектика природы. В кн.: Маркс К, Энгельс Ф. Сочинения. М.: Политиздат; 1961. Т. 20, с. 339-626.

Общий список литературы/Reference List

1. Ackoff R. [On the nature of systems]. Izvestiya AN SSSR Ser Tekhnicheskaya Kibernetika. 1971;(3):68-75. (In Russ.)

2. Belayev VI, Ivakhnenko AG, Fleishman BS. [Simulation, self-organization and potential efficiency]. *Avtomatika*. 1979;(6):9-17. (In Russ.)
3. Brusilovsky PM, Rozenberg GS. [Checking for inadequacy a simulation model of dynamic system using the GMDH algorithms]. *Avtomatika*. 1981;(6):43-48. (In Russ.)
4. Brusilovsky PM, Rozenberg GS. [Model storm in studying of environmental systems]. *Zhurnal Obshej Biologii*. 1983;44:254-62. (In Russ.)
5. Bukatova IL. *Evolutsionnoye Modelirovaniye i Yego Prolozheniya [Evolutionary Modeling and its Applications]*. Moscow: Nauka; 1979. (In Russ.)
6. Vittikh VA. *Paradigma Ogranichennoy Rational'nosti Priniatiya Resheniy: Preprint*. Samara: Institut Problem Upravleniya Slozhnymi Sistemami RAN; 2009. (In Russ.)
7. Gastev YuA. *Gomomorfizmy i Modeli (Logiko-algebraicheskie Aspekty Modelirovaniya)*. Moscow: Nauka; 1975. (In Russ.)
8. Grinin AS, Orekhov NA, Novikov VN. *Metamaticeskoye Modelirovaniye v Ekologii Uchebnoye Posobiye [Mathematical Modeling in Ecology: a Manual]*. Moscow: UNITY-Dana, 2003. (In Russ.)
9. Yeskov VM. *Tret'ya Paradigma [The Third Paradigm]*. Samara: Ofort; 2011. (In Russ.)
10. Zhuchenko AA. [Biologization and ecologization of intensification processes in agriculture]. *Vestnik Orlovskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*. 2009;18(3):8-12. (In Russ.)
11. Ivakhnenko AG. *Samoobuchayuschiyesia Sistemy Raspoznavaniya i Avtomaticheskogo Upravleniya. [Self-Learning Recognition Systems and Automatic Control]*. Kiev: Tekhnika, 1969. (In Russ.)
12. Lefebvre VA. *Konfliktuyuschiye Struktury [Conflicting Structures]*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1973. (In Russ.)
13. Menshutkin VV. *Imitatsionnoye Modelirovaniye Vodnykh Ekologicheskikh Sistem. [Simulation of Aquatic Ecological Systems]*. Saint Petersburg: Nauka; 1993. (In Russ.)
14. Mirkin BM, Rozenberg GS. [Systemic approach to phytocenology]. *Zhurnal Obshej Biologii*. 1978;39:167-78. (In Russ.)
15. Nalimov VV. [Is knowledge scientific to the extent it is mathematized? The Biological aspect of the problem]. In: *Matematizatsiya Sovremennoy Nauki: Predposylki, Problemy, Perspektivy*. Moscow: AN SSSR; 1986. p. 103-11. (In Russ.)
16. Polyansky A. [In vivo – In vitro – In silico]. <http://biomolecula.ru/content/>. (In Russ.)
17. Rabotnov TA, Uranov AA. [Preface to the Russian edition]. In: Greig-Smith P. *Kolichestvennaya Ekologiya Rasteniy [Quantitative Plant Ecology]*. Moscow: Mir; 1967. p. 5-11. (In Russ.)
18. Riznichenko GYu. *Matmaticheskiye Modeli v Biofizike i Ekologii. [Mathematical Models in Biophysics and Ecology]*. Izhevsk: Institut Kompyuternyh Issledovaniy; 2003. (In Russ.)
19. Rozenberg GS. [Mathematical modeling of phytocenotic systems]. *Bulleten' Moskovskogo Obschestva Ispytateley Prirody Otdeleniye Biologicheskoye*. 1980;85(2):79-88. (In Russ.)
20. Rozenberg GS. *Mathematical modeling in extensive and intensive geobotanical studies: (dissertation)*. Tartu: Tartuskiy Gosudarstvennyi Universitet; 1983. (In Russ.)
21. Rozenberg GS. *Modeli v Fitotsenologii [Models in Phytocenology]*. Moscow: Nauka; 1984. (In Russ.)
22. Rozenberg GS. [On systems ecology]. *Zhurnal Obshej Biologii*. 1988;49:580-91. (In Russ.)
23. Rozenberg GS. [The adequacy of mathematical modeling of ecological systems]. *Ekologiya*. 1989;(6):8-14. (In Russ.)
24. Rozenberg GS. [On the potential effectiveness models of ecological systems]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2003;5:34-43. (In Russ.)
25. Rozenberg GS. [Models of potential effectiveness of populations and ecological systems]. *Vestnik Nizhegorodskogo Universiteta Seriya Biologicheskaya*. 2005;1(9):163-80. (In Russ.)
26. Rozenberg GS. [On the approaches to developing of theoretical ecology]. *Uspekhi Sovremennoy Biologii*. 2005;125(1):14-27. (In Russ.)
27. Rozenberg GS. [Systemic-methodological problems of modern ecology]. In: *Kolichestvennye Metody Ekologii i Gidrobiologii. [Qualitative Methods of Ecology and Hydrobiology]* Togliatti: Samarskiy Nauchnyi Tsentr RAN; 2005. p. 22-36. (In Russ.)
28. Rozenberg GS. [Ecology and systemology: A synthesis of theory]. *Biosphere*. 2012.4(1):1-7. (In Russ.)
29. Rozenberg GS. *Vvedeniye v Teoreticheskuyu Ekologiyu. [Introduction to Theoretical Ecology]*. Togliatti: Kassandra; 2013. (In Russ.)
30. Rozenberg GS. [Holism + reductionism: two roads to the Temple]. *Vestnik RAN*. 2014;84(8):43-6. (In Russ.)
31. Rozenberg GS, Kudinova GE. [Systems approach in studies of ecological-economic systems]. In: *Ekologiya i Bezopasnost Zhiznedeятel'nosti Promyshlennno-Transportnykh Sistem (ELPIT 2003) [Ecology and Life Protection of Industrial-Transport Complexes (ELPIT 2003)]*. Togliatti: Tol'yatinskiy Gosudarstvennyi Universitet; 2003. p. 17-22. (In Russ.)
32. Tutubalin VN, Barabasheva YuM, Grigoryan AA, Devyatkov GN, Uger EG. *Matematicheskoye Modelirovaniye v Ekologii (Istoricheskiy i Metodologicheskiiy Analiz) [Mathematical Modeling in Ecology (Historical and Methodological Analysis)]*. Moscow: Jazyki Russkoy Kul'tury; 1999. (In Russ.)
33. Filimonov VA. [Cross-technologies of the Situational Center – A testing area of cybernetics]. *Matematicheskiye Struktury i Modelirovanie*. 2014;3(31):87-98. (In Russ.)
34. Fleishman BS. *Osnovy Sistemologii [Principles of Systemology]*. Moscow: Radio i Sviyaz'; 1982. (In Russ.)
35. Fleishman BS, Brusilovsky PM, Rozenberg GS. [On Methods of mathematical modeling of complex systems]. In: *Sistemnye Issledovaniya. Metodologicheskiye Problemy [System Research. Methodological problems]*. Moscow: Nauka; 1982. p. 65-79. (In Russ.)
36. Hedgpeth JB. [Models in ecology and confusion around them. Some philosophical considerations]. *Biologiya Moria*. 1978;(6):3-15. (In Russ.)

37. Engels F. [Dialectics of Nature]. In: Marx K., Engels F. Sochineniya Tom 20. Moscow: Politizdat; 1961. p. 339-626. (In Russ.)
38. Danchin A, Medigue C, Gascuel O. From data banks to data bases. *Res Microbiol.* 1991;142(7-8):913-16.
39. Johnson AT. *Biological Process Engineering: An Analogical Approach to Fluid Flow, Heat Transfer, and Mass Transfer Applied to Biological Systems.* N. Y.: John Wiley and Sons; 1999.
40. Kettenring KM, Martinez BT, Starfield AM, Getz WM. Good practices for sharing ecological models. *BioScience.* 2006;56(1):59-64.
41. McIntosh R. A continuum concept of vegetation: Reply. *Bot Rev.* 1968;34:253-332.
42. Miramontes P. Un modelo de autómatas celular para la evolución de los ácidos nucleicos [A cellular automaton model for the evolution of nucleic acids]. Tesis de doctorado en matemáticas. UNAM; 1992.
43. Murray JLS, Jumars PA. Clonal fitness of attached bacteria predicted by analog modeling. *BioScience.* 2002;52:343-55.
44. Sieburg HB. Physiological studies in silico. *Complex Systems.* 1991;12:321-42.
45. Shannon CE. The Bandwagon. *IRE Transactions – Information Theory.* 1956;2(1):3.
46. Zaitsev V. Analog modeling as a base component for forecasting the consequences caused by climatic changes. In: *Second International Conference on Earth System Modelling (ICESM).* Abstracts. 2007; 1: ICESM2007-A-00155.

