

УДК 519.6 + 57.011

ГЛОБАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ БИОСФЕРЫ

(К 100-летию со дня рождения Никиты Николаевича Моисеева)

Г.С. Розенберг

Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, Россия

Эл. почта: genarozenberg@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.03.2017; принята к печати 25.06.2017.

Представлен обзор подходов к имитационному моделированию и конкретных моделей глобальных экосистем. Имитационное моделирование в современном экологическом исследовании – необходимый этап, позволяющий глубже проникнуть в сущность изучаемого объекта или явления. Рассмотрены модели мировой динамики Дж. Форрестера, «World-3» Д. Медоуза с соавторами, «Гая» Н.Н. Моисеева с соавторами, минимальная модель биосферы С.И. Барцева с соавторами.

Ключевые слова: биосфера, имитационная модель, блочный принцип, модель мировой динамики, модель «Гая».

GLOBAL MODELS OF THE DYNAMICS OF THE BIOSPHERE

(a review dedicated to NIKITA N. MOISEYEV's birth centenary)

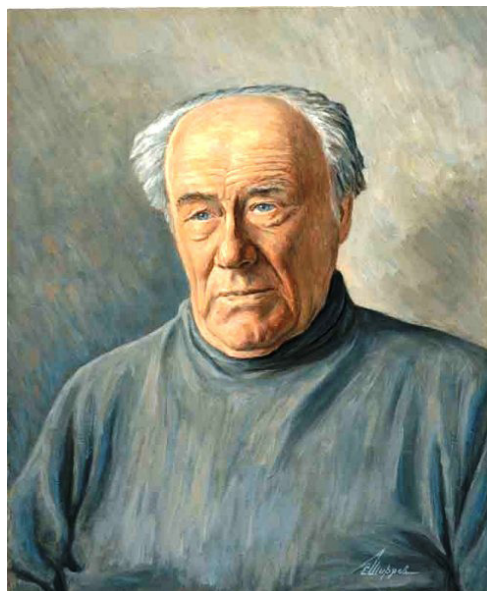
G.S. Rozenberg

Institute of Ecology of the Volga River Basin, Tolyatti, Russia

E-mail: genarozenberg@yandex.ru

Approaches to simulation modeling and some specific models of global ecosystem are reviewed. Simulation in modern ecological research is necessary for gaining deeper insights into the essence of the studied objects or phenomenon under consideration. The global model developed by J. Forrester, D. Meadows et al. (World-3), and N.N. Moiseyev et al. (Gaia) and the minimal model of biosphere suggested by S.I. Burtsev et al. are discussed.

Key words: biosphere, simulation model, modular principle, «Gaia» global model.



Портрет Никиты Николаевича Моисеева
работы Е.Е. Ширяева.
Холст, масло. 67 × 100

Никита Николаевич Моисеев (10[23].08.1917–29.02.2000), отечественный ученый в области общей механики и прикладной математики, академик АН СССР (впоследствии РАН) и ВАСХНИЛ (впоследствии РАСХН), президент Российского отделения «Зеленого креста», один из основателей и президент Международного независимого эколого-политологического университета (МНЭПУ; 1993–2000), главный редактор журнала «Экология и жизнь», председатель Научно-технического совета Федеральной целевой программы «Оздоровление экологической обстановки на реке Волге и ее притоках, восстановление и предотвращение деградации природных комплексов Волжского бассейна на период до 2010 года («Возрождение Волги»)). Н.Н. Моисеев – основоположник целого ряда новых направлений в прикладной математике, в том числе имитационного моделирования глобальных экосистем; в последние годы жизни он много внимания уделял междисциплинарным исследованиям социально-эколого-экономических проблем [53].

Введение

Одной из предпосылок преодоления наблюдающегося сейчас экологического кризиса и достижения так называемого *устойчивого развития*, постулированного на саммите в Рио-де-Жанейро в 1992 г. [11, 24, 56, 69] и подтвержденного на саммитах в Йоханнесбурге в 2002 г. (Рио + 10; [25, 81]) и вновь в Рио-де-Жанейро в 2012 г. (Рио + 20; [14, 27]), является исследование его на глобальных математических моделях биосферы в целом.

Датировать начало глобальных исследований (биосферы в целом и «экологии человечества» по Н.Н. Моисееву [52, с. 54]; влияние человека на процессы планетарного характера) непросто. По-видимому, основателем такого рода «глобальных исследований» следует считать В.И. Вернадского. В силу уникальности и сложности самого объекта исследования – био сферы, «расширением» экспериментирования со сложными системами становится эксперимент с моделью такой системы; «единственным инструментом глобалистики являются математические модели – модели процессов общепланетарного масштаба» [52, с. 59]. В этом контексте первой такой глобальной моделью была модель круговорота веществ В.А. Костицына [36], предложенная им еще в 1935 г., – 13 уравнений, более 30 коэффициентов (вполне проходит под разряд квазиимитационной модели – см. ниже).

О содержании метода имитационного моделирования

Развитие методов имитационного моделирования самым тесным образом связано с развитием и увеличением доступности цифровых технологий, которые являются принципиально необходимым инструментом имитационного моделирования. В экологических исследованиях имитационное моделирование было индуцировано работами в рамках Международной биологической программы (с 1964 г.) и программы «Человек и Биосфера» («Man and Biosphere» [МAB] с 1970 г.). Следует отметить, что вести речь об «имитации» нужно только в тех случаях, когда поведение сложной системы нельзя предсказать для обозримого набора переменных и параметров (в этом состоит отличие имитации от просто расчетов). В данном контексте приведем обширную цитату из работы Н.Н. Моисеева [51, с. 210]: «И первое, что оказывается необходимым для реализации подобных идей, – это умение организовать серию вариантных расчетов: эксперту важно представить себе характер изучаемого процесса, степень его “управляемости”, характер предельных возможностей (множеств достижимости), то есть организовать многократно повторенный машинный эксперимент с моделью. Для этой цели и должны быть созданы модели, имитирующие реальность, имитирующие изучаемый процесс. Эксперт с

помощью этих моделей, с помощью серии специально организованных вариантных расчетов получает те знания, без которых выбрать альтернативный вариант своей стратегии он не может. Эти возможности ЭВМ были быстро поняты специалистами, и в русском языке появились даже термины “имитационная модель” и “имитационное моделирование”, а в английском языке – “*simulation modeling*”. Надо отметить, что если в английском языке термин имеет вполне четкий смысл, ибо симуляция и моделирование не являются синонимами, то *по-русски имитационная модель – это нонсенс* (выделено мной. – Г.Р.). Любая модель, в принципе, имитационная, ибо она имитирует реальность». О том же более кратко писал А.Б. Горстко [22, с. 14]: «Каждая модель есть подражание, но уровни подражания различны».

Может быть, Н.Н. Моисеев и А.Б. Горстко правы, если акцентировать внимание на сути терминов «модель» и «моделирование». Но мне более импонирует точка зрения Ю.Б. Колесова и Ю.Б. Сениченкова [29, 30], которые отмечают, что в русском языке прилагательное «имитационный» часто используют как синоним прилагательных «сходный», «похожий». Среди словосочетаний «математическая модель», «аналоговая модель», «статистическая модель» понятие «имитационная модель», появившееся в русском языке, как часто бывало, в результате неточности перевода, постепенно приобрело новое, отличное от первоначального значение. Указанием на то, что данная модель имитационная, обычно подчеркивается, что, в отличие от других типов абстрактных моделей, в этой модели сохранены и легко узнаваемы такие черты моделируемого объекта, как структура, связи между компонентами, способ передачи информации. Сходную позицию находим и в более ранней монографии [26].

С имитационными моделями также обычно связывают и требование иллюстрации их поведения с помощью принятых в данной прикладной области графических образов. С учетом последнего замечания имитационную модель следует рассматривать как специальную форму математической модели, в которой [30]:

- декомпозиция системы на компоненты производится с учетом структуры проектируемого или изучаемого объекта;
- в качестве законов поведения могут использоваться экспериментальные данные, полученные в результате натурных экспериментов;
- поведение системы во времени иллюстрируется заданными динамическими образами.

Н.Н. Моисеев [46, 47, 50, 51 и др.] подчеркивал, что для успешной реализации построения моделей в рамках имитационного моделирования необходимо наличие *имитационной системы*, которая включает систему внутреннего (собственно имитационная модель и

математические методы ее анализа) и внешнего математического обеспечения (наличие специализированных языков программирования, устройств и разного рода техники, позволяющих реализовывать модель на ЭВМ).

При построении имитационных моделей конкретных экосистем используется практически вся имеющаяся информация о структуре и поведении этих объектов, причем разработчики имитационной модели сознательно стараются избежать каких бы то ни было серьезных упрощений [7–9, 72, 90, 97, 105]. Такой подход импонирует специалистам-экологам, которые занимаются конкретными проблемами и с большим трудом «добывают» эмпирическую информацию.

С другой стороны, некоторые исследователи ([86, 93] и др.) отмечают, что эффективность столь сложных моделей очень незначительна, что эти модели ограничены в своих даже прогностических возможностях (не говоря уж об отсутствии объяснительной способности), они весьма иллюзорны в своих претензиях на полное и точное описание моделируемых сложных систем, что «построение весьма широких и сильных моделей не является рациональным... это противоречит сильно распространенному, особенно среди биологов, мнению о том, что модель должна “возможно полнее” отображать свойства оригинала» [60, с. 129] и что «ясно, что такая “очень большая модель”, даже если бы она была построена, не смогла бы работать» [3, с. 371].

Думается, что в этом случае исследователи спорят о двух «сторонах одной медали» – о возможности имитационного моделирования нести объяснительную и предсказательную функции строящейся теории данного класса моделируемых экосистем. Имитационная модель может претендовать лишь на выполнение предсказательной функции и то при условии, что заложенные в ее основу предположения о характере зависимости элементов системы и ее поведении непротиворечивы и, в известной степени, адекватны реальному объекту [81, 82]. Это связано со следующими причинами:

- в силу того, что при построении имитационной модели исследователи сознательно стараются избежать разного рода упрощений и учесть по возможности все связи элементов системы, имитационная модель реальной системы по своей сложности будет приближаться к моделируемому объекту (в соответствии с выражением Н. Винера, которое любил повторять А.Г. Ивахненко, – «лучшей материальной моделью кошки является другая, а желательно, та же самая кошка»);
- при построении имитационных моделей происходит своего рода «навязывание» представлений исследователя о характере связей компонентов системы и процессах, протекающих в ней; именно это заставляет по-новому воспринимать совершенно

справедливое замечание В.М. Котлякова [37, с. 143] о том, что «имитационные модели не могут заменить эмпирическую оценку экологических воздействий» (см. еще [38]).

Таким образом, объяснительные функции следует «закрепить» за относительно простыми аналитическими моделями, отдав предсказательные – имитационным.

Можно предложить несколько классификаций имитационных моделей. Так, А.Б. Горстко [22] различает:

- *имитацию нулевого ранга* (подражание в области законов – обычные математические, в том числе и аналитические, модели; идеологию с использованием MS Excel см.: [35]);
- *имитацию первого ранга* (подражание в области законов и поведения случайных величин – модели систем массового обслуживания, реализуемые методом Монте-Карло);
- *имитацию второго ранга* (подражание в области поведения систем, а также законов и случайных величин, если они используются в модели).

Можно указать и иные признаки, по которым удобно отличать имитационные модели от всех остальных. Одним из обязательных признаков, как это уже отмечалось выше, является *использование ЭВМ*. Вторым признаком (*блочный принцип построения модели*) нередко позволяет преодолеть «проклятие многомерности» [6, 89] или «угрозу необозримости модели» [71] при построении имитационной модели, и потому остановимся на нем более подробно.

Как уже указывалось, методология построения имитационной модели основана на учете по возможности большего числа входящих в систему элементов и связей между ними – «имитационные модели описывают экосистему по возможности с максимальной степенью учета всех имеющихся данных» [9, с. 107]. Именно здесь модельера поджидает «проклятие многомерности», возникающее при увеличении числа переменных n функции объекта, поведение которого желают прогнозировать и которым желают управлять [112]. А.Н. Колмогоров [31] конкретизировал это число, разделив все числа на малые ($n_1 = n$), средние ($n_2 = 2^n$) и большие ($n_3 = 2^{2^n}$). Преимущества ЭВМ при работе с малыми и средними числами сразу же исчезают при переходе к большим: невозможность их машинного перебора наступает уже при $n > 10$.

Преодолению этого недостатка способствует *блочный принцип* (или *принцип расщепления, модульный принцип*) построения имитационных моделей, позволяющий всю моделируемую систему «разбить» на ряд подсистем, которые связаны между собой незначительным числом «обобщенных взаимодействий» и могут быть верифицированы до включения их в общую модель. Блочная структура моделей связана и с необходимостью «описания взаимодействия про-

цессов самой различной природы (физических, физико-химических, биологических, экологических) и обладающих самыми различными временами переходных процессов. Блочный принцип конструирования модели означает ее декомпозицию, как на содержательном, так и на формальном уровне описания» [26, с. 183–184]. Описание взаимосвязей параметров внутри каждого блока, в принципе, может быть выполнено с использованием своего собственного математического аппарата (например, блок «Почва» описан системой дифференциальных уравнений, блок «Погодные условия» – случайным процессом и т. д.). Этот подход позволяет также достаточно просто заменять отдельные блоки, конструируя новую имитационную модель. Соподчинение блоков в модели может быть как последовательным, так и перекрестным [8, 9, 22, 28, 83–85, 87, 98–103, 106–108, 116, 119, 120]. Формальное описание блоков может быть задано агрегатами Н.П. Бусленко [15, 16].

Таким образом, блочный принцип построения имитационных моделей позволяет проводить специализацию исследователей (например, блок «Почва» может быть отдан на разработку специалистам-почвоведом, блок «Растительность» – геоботаникам, блок «Энтомофауна» – энтомологам и т. д. [87, 123, 124]). Правда, разбиение экосистемы на ряд «блоков», которые, в свою очередь, могут быть разделены на «субблоки», осуществляется неоднозначно. «Для системы, в которой компоненты-подсистемы эволюционируют совместно, не очевидно, что последние отделимы друг от друга... Разложение сложной системы на подсистемы может быть произведено многими способами, так что вовсе не очевидно, что же такое, собственно говоря, подсистема» [113, р. 73]. Замечу, что, в соответствии с «законом Брукса»¹, максимальное число разработчиков имитационной модели зависит от числа независимых подзадач – блоков системы [12, с. 26; 89].

Разбиение системы на блоки во многом зависит от целей исследования. Так, в ряде работ подчеркивается, что экосистемы более крупного масштаба в одних условиях могут подразделяться на экосистемы более мелких масштабов, в других – на синузиды и абиогенные составляющие, в третьих – на отдельные популяции видов, входящих в эту экосистему, и т. д. «Рациональное разделение биогеоценоза на блоки определяется тем, что в зависимости от цели, которая

¹ Закон Брукса гласит: «Если проект не укладывается в сроки, то добавление рабочей силы задержит его еще больше»; продолжительность осуществления проекта зависит от ограничений, накладываемых последовательностью работ; максимальное количество разработчиков зависит от числа независимых подзадач. Эти две величины позволяют получить график работ, в котором будет меньше занятых разработчиков и больше месяцев.

преследуется исследованием, нужно выделить те составляющие, которые значимы в рамках задач данного исследования [43, с. 1083]. Определение значимости составляющих и декомпозиция системы – процедура, в известной степени субъективная, таящая в себе возможность совершения ошибки (процедура деления системы на блоки связана с общей проблемой редукционизма [68], при которой редукция используется не как набор постулатов [составляющая парадигмы «физикализма»], а в качестве рабочего метода [45]). Кроме того, блочный принцип построения имитационной модели таит опасность накопления систематической ошибки потери точности при прогнозировании [23].

При всех отмеченных недостатках и дополнительных усложнениях этот принцип все же значительно упрощает всю процедуру построения имитационной модели:

- каждый блок может быть описан с помощью того аппарата, который представляется наиболее адекватным тому или иному процессу;
- повышается возможность идентификации модели;
- возникает необходимость интеграции усилий многих исследователей, так как построение различных блоков может быть доверено разным коллективам исследователей;
- уменьшаются технические трудности, связанные с ограниченностью памяти ЭВМ, используемых для моделирования экологических систем и процессов.

Все это позволило предложить такую классификацию моделей [66]:

Использование ЭВМ	Блочность	
	Да	Нет
Да	Имитационные модели	Квази-имитационные модели
Нет	Супераналитические модели (примеры таких моделей автору неизвестны)	Аналитические модели

Таким образом, *имитационной* в полном смысле можно считать математическую модель, построенную по блочному принципу и реализованную на ЭВМ. Кроме того, имитационную модель, в которой определены все коэффициенты по результатам экспериментов над некоторой конкретной экосистемой, можно назвать *портретной* моделью данного объекта. Хотя в принципе можно утверждать, что «все модели являются имитационными, но некоторые из них следует считать более имитационными, чем другие» [26, с. 181].

Примеры некоторых моделей биосферы

Модель мировой динамики

Пионером построения именно имитационных глобальных эколого-экономических моделей биосферы стал Д. Форрестер (Jay Forrester), который в 1971 г. опубликовал результаты моделирования изменений в биосфере и мировой экономике; модель была построена на основе разработанных им принципов системной динамики [85, 100]. Эта очень упрощенная модель содержит 5 блоков:

- население;
- капиталовложения (фонды);
- природные невозобновляемые ресурсы;
- доля фондов, вкладываемых в сельское хозяйство;
- уровень загрязнения среды.

Даже самые простые предположения, заложенные в основу этой, в общем-то, демонстрационной модели (разведанных природных ресурсов должно хватить на 250 лет развития человечества при сохранении темпов их использования на уровне 1970 г.), продемонстрировали (рис. 1), что рост потребления ресурсов в 1,5 раза за период с 1970 по 2000 г. из-за увеличения численности населения и капиталовложений ведет к ускоренному сокращению природных ресурсов и связанному с этим сокращению численности населения.

Модель World-3

В ее основе лежали более ранние модификации (World, World-2), и она появилась на год позже модели Форрестера [44, 114]. Результаты ее анализа позволили авторам прийти к выводу о том, «что воздействие на окружающую среду в масштабах земного шара (расходование природных ресурсов и выбро-

сы загрязнений) сильно скажется на развитии мира в XXI в. «Пределы роста» предупреждали о том, что человечеству придется направлять все больше усилий и капитала на борьбу с ухудшением состояния окружающей среды – возможно, настолько больше, что в XXI в. это приведет к снижению уровня жизни [44, с. 16]. Не вдаваясь в описание этой модели, приведу одну большую цитату [44, с. 24], которая косвенно свидетельствует о качестве модели World-3: «Тем, кто больше уважает цифры, мы можем сообщить: итоговые сценарии модели World-3 оказались на удивление точными – прошедшие 30 лет подтвердили это. Численность населения в 2000 г. – порядка 6 млрд чел. в сравнении с 3,9 млрд чел. в 1972 г. – оказалась именно такой, какой мы рассчитывали ее по модели World-3 в 1972 г. Больше того, сценарий, показывающий рост мирового производства продовольствия (с 1,8 млрд т в год в зерновом эквиваленте в 1972 г. до 3 млрд т в 2000 г.), практически совпал с реальными цифрами. Доказывают ли такие совпадения, что наша модель правильна? Разумеется, нет. Но они подтверждают, что модель World-3 вовсе не была абсурдной, как это заявляли критики. Ее предположения и наши заключения актуальны и сегодня».

После этих работ интерес к глобальному моделированию резко возрос – в рамках «Римского клуба» появились модели М. Месаровича (Mihajlo [Mike] D. Mersarovič), Э. Пестеля (Eduard Pestel), В. Леонтьева (Vasilij Leontiev) и др.; у нас в стране модели «форрестерского типа» исследовали В.А. Геловани с соавторами [19–21, 104]; модель «Гея» была создана группой исследователей во главе с Н.Н. Моисеевым [39, 42, 48–50, 54, 55, 58, 73, 76–80]. Принципиальное отличие последней модели от моделей «форрестерского типа» состоит в том, что основной упор в ней сде-

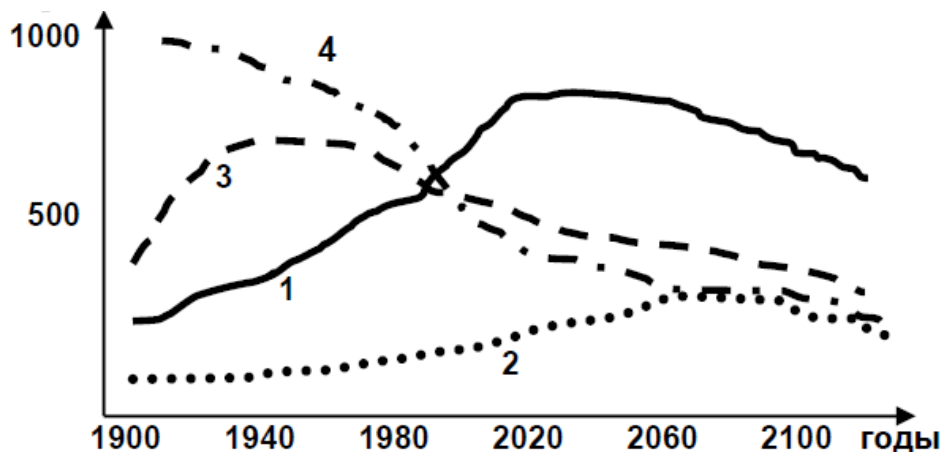


Рис. 1. Динамика некоторых характеристик (условные единицы) состояния биосферы по модели Д. Форрестера: 1 – население; 2 – загрязнение; 3 – качество жизни; 4 – природные ресурсы

лан на экологическую, а не на экономическую составляющую сложной системы человек-природа, то есть при построении модели авторы исходили из общесистемных представлений о биосфере, основу которых заложил еще В.И. Вернадский. Далее рассмотрю очень конспективно экологические блоки имитационной модели динамики биосферы «Гея».

Модель «Гея»

Работы Форрестера и Медоуза по глобальной динамике не только возбудили широкий общественный интерес к этой проблематике, но и вызвали весьма острую критику. Отправной точкой исследований Н.Н. Моисеева [1, 116] и его коллег (см., например, [93]) также стала критика этих работ. Она способствовала разработке программы создания системы моделей взаимодействий процессов в биосфере и человеческой активности. На первом этапе была построена модель взаимодействия процессов в атмосфере и в океане, влияющих на погоду и климат, – эти работы возглавил В.В. Александров при участии Г.Л. Стенчикова [2]. В дальнейшем в модель были «включены» блоки круговорота O_2 , CO_2 , растительность, фитопланктон, гумус почвы и пр.; эти блоки имитационной модели «Гея» создавались при участии В.Ф. Крапивина, Ю.М. Свирежева, А.М. Тарко и др. [42, 54, 73].

Вся биосфера представлена четырьмя регионами: атмосфера, океан, суша-1 и суша-2. Предполагается, что при равных энергетических и природных ресурсах в регионе суша-1 принимаются меры к снижению скорости генерации загрязнений (до 2000 г. – в 2 раза), уменьшению скорости расходования минеральных не возобновляемых ресурсов (на 15%), возрастанию продуктивности животноводства (на 10%), снижению интенсивности вылова рыбы (на 25%); в регионе суша-2 сохраняются современные тенденции воздействия на природу. В этой очень примитивной гетерогенности территории уже состоит отличие данной модели от моделей «форрестерского типа».

Чтобы как-то учесть все многообразие форм растительности и при этом не переусложнить модель, в ее рамках рассматриваются три типа растительности: леса, естественная травяная растительность и сельскохозяйственные посевы растений [55]. Изменение фитомассы растительности каждого типа описывается дифференциальными уравнениями первого порядка, которые представляют собой сложные эмпирические функции освещенности, температуры, состояния гумуса, количества вносимых удобрений, влажности, газового режима атмосферы и т. д. (всего модель содержит 218 эмпирически определяемых коэффициентов, которые все «наполнены» физико-биологическим содержанием [39, с. 223]). Общая схема динамики фитомассы (увеличение за счет фотосинтеза и уменьшение за счет дыхания, естественного отмирания и

отчуждения части растений в качестве продуктов питания животных и людей) ничем не отличается от подобных схем более частных моделей, ряд из которых рассмотрен выше. Различия проявляются лишь в аналитической структуре моделей (то есть в характере зависимости между входящими в модель переменными).

Модель глобального развития биосферы позволяет провести с ее помощью целый ряд экспериментов с целью оценки перспективности возможных управлений процессами воздействия на окружающую среду. В частности, на рис. 2 приведена прогнозируемая динамика общей фитомассы растительности до 2300 г. [39, с. 234]. Резкое увеличение фитомассы растительности в первом случае (более чем в два раза по сравнению с 1970 г. при сохранении темпов воздействия человека на биосферу, которые наблюдаются в настоящее время, – регион суша-2) связано с тем, что модель прогнозирует к 2300 г. еще более резкое снижение численности населения (следовательно, доля растений, идущих в пищу, уменьшается). По этому же сценарию модель прогнозирует уменьшение замутненности атмосферы за счет уменьшения количества пылевых частиц искусственного происхождения, что влечет увеличение скорости фотосинтеза. Во втором случае (сценарий регион суша-1) общая фитомасса растительности претерпевает некоторые колебательные изменения, оставаясь в исходных и допустимых пределах.

Эксперименты с глобальными моделями показывают смысловую непротиворечивость сделанных предположений о связи тех или иных переменных. Правда, необходимо учитывать определенную долю условности этих прогнозов – высокая степень агрегированности модели приближает данную имитацию к аналитическим моделям, для которых справедливы лишь качественные выводы. «Модель всегда создается с какой-то конкретной целью, и она должна быть полезна именно для этой цели – например, чтобы ответить на ряд конкретных вопросов. При использовании модели надо всегда помнить о ее ограничениях и о том, что на все вопросы она ответы дать не может» [44, с. 154].

Нельзя не упомянуть и о существенном «политическом эффекте» этой модели и последовавшего сравнения ее с «американским аналогом»: «Перед нами на ту же тему говорил руководитель Национального центра атмосферных исследований (США) профессор Шнайдер (Stephen H. Schneider. – Г.Р.), который сообщил о результатах расчетов изменения климата на планете в первые двадцать дней после ядерной войны. Наши расчеты были выполнены на совершенно иных машинах, по другим программам, охватывали куда более длительный период и, главное, основывались на совершенно иной в методологическом отношении модели. Обе группы даже не знали о работах

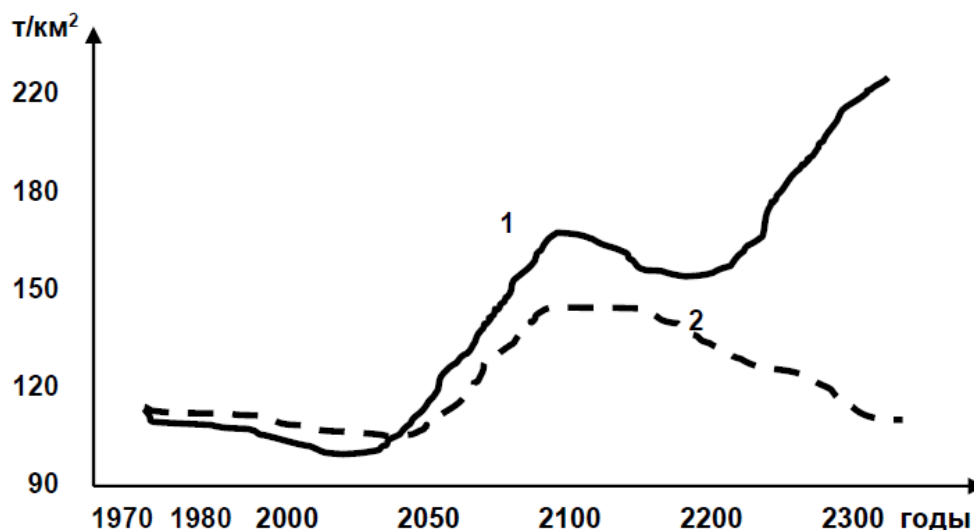


Рис. 2. Прогнозируемая динамика общей фитомассы растительности по модели «Гейя»: 1 – сценарий для региона суша-2; 2 – сценарий для региона суша-1

друг друга. И тем не менее, прогнозы на первые три недели неожиданно для самих их авторов оказались очень близки. Не только общие тенденции изменения климата Земли, но и средние температуры, и расположение зон с экстремальным похолоданием, и картина движения воздушных масс – все совпало буквально до деталей. Это совпадение, которое заставило с доверием отнестись и к более долгосрочным прогнозам, само по себе было сенсацией – в известном смысле не меньшей, чем приводимые в докладе цифры... В отличие от непосредственных фактов ядерного поражения факторы климатические носят глобальный характер. “Ядерная зима” и “ядерная ночь”, отсутствие света, пищи, пресной воды, отравление атмосферы токсичными газами затронут всю планету в равной степени. В этой войне не может быть не только победителей и побежденных, но даже нейтральных. Причем роковым может оказаться и сравнительно небольшой ядерный конфликт. Значит, приобщение каждой новой страны к ядерным арсеналам увеличивает угрозу не только для ее потенциальных противников, но и для всего мира, становится предметом законной озабоченности всех остальных стран – и ядерных, и неядерных... Но запрет на применение ядерного оружия мало “вычислить”. Необходимо добиться, чтобы он из “модельного запрета” – граничного условия модели – превратился в абсолютный политический, нравственный, военный императив. И значит, просветительная функция науки оказывается едва ли не самой главной из ее функций... И после конференции их [ученых] усилия были направлены прежде всего на то, чтобы донести эти новые представления до осознания наро-

дов, политических и военных деятелей» [1, с. 66, 73, 74]. Можно с полной уверенностью констатировать, что во многом именно эти исследования и дальнейшая работа по их «внедрению в головы» остановили угрозу развязывания ядерной войны в XX в., ускорив процесс политической разрядки и притормозив гонку вооружений.

Чтобы покончить с такого рода «политической экологией», приведу цитату В. Гейзенберга [18, с. 121], которая, как мне кажется, весьма точно характеризует соотношение «ученый – общество» и «ученый – власть»: «Влияние науки на политику стало много больше, чем оно было перед Второй мировой войной, и это обстоятельство налагает двойную ответственность на ученых... Ученый может или активно участвовать в управлении своей страной ввиду важности науки для общества (в этом случае он должен в конечном счете взять на себя ответственность за такие важные решения, которые выходят далеко за рамки решений, связанных с узким кругом исследовательской и университетской работы, к которой он привык до сих пор), или же он может отстраняться от всякого участия в решении политических вопросов. Потом он все же будет ответствен за ложные решения, которым он мог бы, пожалуй, воспрепятствовать, если бы он не жил спокойной жизнью кабинетного ученого. Очевидно, долг ученых – информировать свои правительства о совершенно не виданных ранее размерах разрушения, которые принесла бы война с применением термоядерного оружия».

Сегодня, как и 30–40 лет назад, интерес к глобальным моделям развития биосферы сохраняет-

ся, – назову лишь серию работ под руководством К.Я. Кондратьева [33, 34, 40, 41, 110–112] и А. Робока с Г.Л. Стенчиковым [118, 119, 122, 123], в которых использованы более современные и точные модели климата, учтены предполагаемые эффекты глобального потепления климата, а также подъем газов и пыли в верхние слои атмосферы. В результате получилось, что похолодание после ядерной войны будет более «мягким» (появилось даже понятие «ядерная осень»), но может продлиться около шести лет и будет не менее катастрофическим. Достаточно подробный обзор таких моделей можно найти в работах [57, 75, 126].

Остановимся еще на одной модели, в основе построения которой лежат принципы форрестерского типа, – это модель глобального развития «Мир-2МС» [74, 75]. Как отмечают авторы, эта модель носит не прогностический характер, а указывает на варианты развития цивилизации. Конкретизация уравнений (задается, например, тот или иной тип роста численности населения), подбор коэффициентов, «прогон» модели по различным сценариям развития – все это позволяет авторам прийти к ряду интересных и нетривиальных выводов. В частности [75, с. 45], развитие цивилизации в третьем тысячелетии должно иметь циклический характер, а число циклов должно увеличиваться пропорционально энерговооруженности цивилизации (при использовании традиционного ископаемого топлива нефть + газ + уголь следует ожидать 3–4 цикла развития, при расширении потенциала за счет сланцевой нефти – до 15 циклов, при широком использовании энергии управляемого термоядерного синтеза число циклов неограниченно возрастает и Мировая система переходит в режим гармонического осциллятора, совершая колебания компонент относительно состояний равновесия). Модель позволяет обосновать ограничение численности населения планеты пределом 1,3–1,7 млрд чел. и смоделировать процесс перехода от циклического к стационарному движению цивилизации подбором порога насыщения численности населения.

К разряду глобальных моделей следует отнести и модели социо-эколого-экономических систем (СЭЭС) планетарного масштаба, направленных на описание и управление достижением так называемого «устойчивого развития», декларированного на саммите в Рио-де-Жанейро в 1992 г. [56]. Причем такое устойчивое развитие рассматривается и для биосферы в целом, и для отдельных государств и крупных биомов и ландшафтных единиц (например, бассейны больших рек [67]). Сразу подчеркну: отношение к концепции устойчивого развития далеко не однозначное, свидетельством чему могут служить названия публикаций на эту тему: «Устойчивое развитие: миф или реаль-

ность?» [17, 59, 70], «Три подводных камня концепции устойчивого развития человечества» [61], «Устойчивое развитие Волжского бассейна: миф – утопия – реальность...» [69], «Парадоксы устойчивого развития» [127]; «Волжский бассейн: на пути к устойчивому развитию» [67] и многие другие.

И все-таки модели оценки экосистемных услуг и природного капитала крупных биомов и биосферы в целом представляются достаточно конструктивными [62–65, 95, 96]. Р. Костанца (Robert Costanza) с коллегами, основываясь на опубликованных материалах и ряде собственных исследований, подсчитали текущую экономическую стоимость 17 экосистемных услуг для 16 биомов. Для всей биосферы стоимость (большая часть которой за пределами рынка) оценивается в 16–54 трлн US\$ в год (в 2012 г.), а в среднем составляет 33 трлн US\$ в год. Из-за неоднозначности оценок авторы предлагают считать эту сумму минимальной. При этом глобальный ВВП равен приблизительно 18 трлн US\$ в год.

Нельзя переоценить значение природного капитала для устойчивого развития всего человечества. Костанца и его коллеги [96] полагают, что, просчитав стоимость каждого гектара земной поверхности, они смогут убедить человечество в том, что экосистемные услуги не бесплатны и природой необходимо дорожить (моральные аспекты защиты природы должны учитываться параллельно с экономической стоимостью). Это полностью соответствует представлениям Б. Коммонера [32, с. 32], который, поясняя свой широко известный четвертый экологический закон «*ничто не дается даром*», писал: «Глобальная экосистема представляет собой единое целое, в рамках которого ничего не может быть выиграно или потеряно, и которое не может являться объектом всеобщего улучшения: все, что было извлечено из нее человеческим трудом, должно быть возмещено. Платежа по этому векселю нельзя избежать: он может быть только отсрочен».

Наконец, приведем высказывание С.Н. Бобылева [10], который много сделал для популяризации у нас представлений об «экосистемных услугах» и «природном капитале»: «Итак, общий диагноз традиционной экономики (рыночной, плановой, административно-командной) – недооценка экологического фактора. Оцениваются только функции природы по обеспечению человека ресурсами, а экосистемные функции, как правило, не имеют цены. В экономической реальности действует суровое правило: “То, что не имеет цены, экономической оценки, – не существует, не учитывается при принятии хозяйственных решений”. В теории для таких случаев даже есть понятие “провалы рынка” – не чувствует рыночный механизм природной деградации. Это стало одной из важных причин глобального конфликта Человека и

Биосферы, необходимости отказа от традиционной рыночной модели и перехода всего человечества на новую модель развития – устойчивого развития, о чем говорилось на саммите ООН в Йоханнесбурге.

Все это позволяет сделать вывод о том, что «стране нужен *федеральный компенсационный эколого-экономический механизм*, который при существующей поддержке регионов через субсидии, дотации, трансферты и пр. учитывал бы ценность региональных экосистем и их услуг для страны и всего человечества. Фактически, необходимо создание *специализированного Фонда* (средства которого могли бы расходоваться на локальном или региональном уровнях. – Г.Р.), который осуществлял бы поддержку проектов экологической реабилитации территорий, развития экологического туризма, “экологически чистого” сельского хозяйства, лесоразведения, народных промыслов и т. д., вел бы работу в направлении инновационной поддержки оригинальных природоохранных технологий и собственно экосистемных услуг» [62, с. 191–192].

Глобальная минимальная модель биосферы

С.И. Барцевым с соавторами [4, 5, 89, 97] предложен подход к построению минимальных математических моделей биосферы, основанный на *принципе наилучшего сценария* как наиболее значимого для принятия решений и практических выводов. Принципиально неустранимая погрешность в оценке параметров любой биосферной математической модели приводит к вероятностному характеру сценариев моделирования. Причина заключается в том, что практически все оценки, учитываемые такой моделью, имеют приближенный характер (в частности, оценки количества углерода в атмосфере варьируют от 600 до 760 Гт, в биомассе – 500–850 Гт, в почве – 1080–2000 Гт, первичная продукция фотосинтеза изменяется от 110 до 120 ГтС/год [5, с. 1413]). Таким образом, для принятия направленных на биосферу практических решений необходимо иметь доверительные интервалы прогноза с «беспрецедентным уровнем значимости». Предлагаемый принцип наилучшего сценария позволяет уйти от учета в модели максимально возможного числа факторов и пространственной неоднородности (классический пример – модель «Гея» Н.Н. Моисеева с коллегами; см. выше) и перевести рассмотрение в область квазиимитационного моделирования.

Система уравнений модели [5, 89] состоит всего из 5 соотношений, которые описывают изменения количества углерода в земной атмосфере, в биомассе живых растений, в органическом веществе остатков, в фотическом и в глубинных слоях океана. Параметрами, оказывающими влияние на динамику биомассы и другие характеристики модели, были выбраны G – коэффициент, характеризующий возможность растений

линейно увеличивать количество биомассы (три значения: 1,2 – 1,6 – 2) и T_{del} – чувствительность климата (меняется через один градус от 2 до 6 °С).

Результаты расчетов по модели показывают, что траектории динамики биомассы группируются в своеобразные «пучки» (для каждого конкретного T_{del} и при линейном росте темпов сжигания углеродосодержащих топлив), причем к началу координат ближе «пучок» для $T_{del} = 6$ °С. В случае полного прекращения сжигания топлива через 60 лет от настоящего времени модель демонстрирует пороговый характер катастрофического процесса (после $T_{del} \geq 6$ °С).

Таким образом, эта модель позволяет продемонстрировать возможность появления в системе «биосфера–климат» необратимых негативных (катастрофических) изменений, вызванных усилением положительной обратной связи «температура – CO₂» вследствие антропогенной эмиссии CO₂ в атмосферу и, более того, даже вычислить так называемые «даты необратимости» для различных вариантов сжигания ископаемых топлив.

Заключение

Несмотря на некоторую недостаточность математического изящества, имитационное моделирование продолжает оставаться одним из широко распространенных методов исследования сложных систем. Имитационное моделирование в современном экологическом исследовании – необходимый этап, позволяющий глубже проникнуть в сущность изучаемого объекта или явления (при имитационном моделировании в модели сквозь призму цели исследования достаточно полно и подробно отображаются «глубинные» свойства экосистемы – ее структура и механизмы функционирования [13]), упорядочить накопленную о нем информацию, предсказывать поведение этого объекта и проводить с моделью эксперименты, которые невозможно осуществить на самом объекте (последнее часто позволяет установить пределы воздействия совокупности антропогенных факторов на экосистему, что, в свою очередь, способствует выбору оптимальной стратегии управления природными процессами при разных режимах хозяйственной деятельности). Однако, принимая решение о разработке имитационной модели некоторой экосистемы, необходимо помнить о трудностях этого подхода и разумно трактовать и использовать получаемые результаты. А.Б. Горстко [22, с. 13] отмечает, что «если вопросы относятся не к выяснению фундаментальных законов и причин, определяющих динамику реальной системы, а к бихевиористскому анализу системы, как правило, выполняемому в сугубо практических целях, то здесь применение имитационного моделирования оправдано и, более того, уместно».

Правда, этот подход вряд ли можно назвать высокоэффективным по следующим причинам [88]:

- «хорошая» имитационная модель (на «гране нашего знания») может быть построена только при больших затратах времени и средств;
- имитационная модель в принципе может не отражать реальную структуру экосистемы, что приведет, в конечном итоге, к неверным выводам, построенным на ее основе;
- очень сложна оценка точности имитационной модели, которая лишь частично может быть решена анализом чувствительности модели к изменению некоторых ее параметров;
- наконец, имитационная модель дает численный результат, в связи с чем возникает опасность «обожествления» чисел, то есть приписывания им большей значимости, чем они имеют на самом деле (этот недостаток имитации особо подчеркивал Д. Хеджпет [87]).

По мере увеличения внешнего сходства результатов экспериментов и имитационного моделирования, достигаемого путем усложнения модели и введением в нее все новых и новых переменных, приходится осоз-

нать, что на этом пути мы все дальше отодвигаемся от создания качественной экологической теории [68].

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что, хотя имитационное моделирование и получило широкое применение в экологии, оно не является «панaceей от всех бед» при построении экологической теории. А так как «разработка и применение имитационных моделей все еще в большей степени искусство, нежели наука» [88, с. 27], то успех или неудача в их использовании (как и в любом другом виде искусства) во многом зависит не столько от самого метода, сколько от того, *как и кто* его применяет.

Благодарности. Частичное финансирование этой работы обеспечили Программа фундаментальных исследований Президиума РАН «Биоразнообразии природных систем. Биологические ресурсы России: оценка состояния и фундаментальные основы мониторинга» и Российский фонд фундаментальных исследований (гранты РГНФ-РФФИ 16-16-63003-Самара и 16-13-63004-Самара, грант РФФИ 17-44-630113 p_поволжье_a).

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Александров ВВ, Моисеев НН. Ядерный конфликт глазами климатологов и математиков. Вестн АН СССР. 1984;(11):65-76.
2. Александров ВВ, Стенчиков ГЛ. О глобальных последствиях ядерной войны. Вычислительная математика и математическая физика. 1984;(1):140-3.
3. Александрова ВД. О методе моделирования в фитоценологии. Ботан журн. 1970;55(3):369-75.
4. Барцев СИ, Дегерменджи АГ, Ерохин ДВ. Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере. ДАН. 2005;401(2):233-7.
5. Барцев СИ, Дегерменджи АГ, Иванова ЮД, Щемель АЛ. Влияние неопределенности оценки параметров минимальной биосферной модели на прогноз биосферной динамики. Изв Самар НЦ РАН. 2009;11:1413-8.
6. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: Изд-во иностранной литературы; 1960.
7. Белолипецкий ВМ, Шокин ЮИ. Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды. Новосибирск: ИНФОЛИО-Пресс; 1997.
8. Беляев ВИ. Теория сложных геосистем. Киев: Наукова думка; 1978.
9. Беляев ВИ. Математическое моделирование экосистем морей и океанов. В кн.: Итоги науки и техники. Общая экология, биоценология, гидробиология. М.: ВИНТИ; 1980. с. 7-83.
10. Бобылев СН. Подмосковные пожары и Йоханнесбург (Экология крепнет экономическими законами). http://fire.nad.ru/2002/10_18_expert.htm
11. Бобылев СН, Гирусев ЭВ, Перелет РА. Экономика устойчивого развития. Учебное пособие. М.: Ступени; 2004.
12. Брукс ФП, мл. Как проектируются и создаются программные комплексы. Мифический человек-месяц. Очерки по системному программированию. М.: Наука; 1979.
13. Брусиловский ПМ, Кожова ОМ. Проблемы прогнозирования состояния экосистем. В кн.: Приемы прогнозирования экологических систем. Новосибирск: Наука; 1985. с.15-23.
14. Будущее, которого мы хотим: итоговый документ Конференции ООН. Рио-де-Жанейро. 2012. <http://www.iblfrussia.org/a-conf.216-l-1-russian.pdf>.
15. Бусленко НП. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. М.: Наука; 1977.
16. Бусленко НП. Моделирование сложных систем. М.: Наука; 1978.

17. Воронин АА. Устойчивое развитие – миф или реальность? Математическое образование. 2000;1(12):59-67.
18. Гейзенберг В. Физика и философия. Часть и целое. М.: Наука; 1989.
19. Геловани ВА, Егоров ВА, Митрофанов ВБ. Решение одной задачи управления в глобальной динамической модели Форрестера. Препринт ИМП АН СССР. М.; 1974.
20. Геловани ВА, Егоров ВА, Митрофанов ВБ. Об одной задаче управления в глобальной динамической модели Форрестера. ДАН СССР. 1975;220(3):137-40.
21. Геловани ВА, Егоров ВА, Митрофанов ВБ, Пинтковский АА. Исследование влияния управления на глобальную модель Форрестера. Проблемы кибернетики. 1976;31:187-224.
22. Горстко АБ. Имитационное моделирование. Известия Северокавказского научного центра высшей школы. Естественные науки. 1977;(2):12-20.
23. Горстко АБ, Эпштейн ЛВ. Имитационная система «Азовское море» – инструмент анализа и прогнозирования. В кн.: Математическое моделирование водных экологических систем. Иркутск: Иркутский университет; 1978. с. 47-58.
24. Данилов-Данильян ВИ, Лосев КС. Экологический вызов и устойчивое развитие. Учебное пособие. М.: Прогресс-Традиция; 2000.
25. Залиханов МЧ. Итоги парламентской части РИО + 10. Наука и практика. 2003;(1):23-9.
26. Заславский БГ, Полуэктов РА. Управление экологическими системами. М.: Наука; 1988.
27. Захаров ВМ. Экология и экономика: современные приоритеты развития. Вестн. Самар. Государственного экономического университета. 2014;(Спец. выпуск):7-14.
28. Кельтон ВД, Лоу АМ. Имитационное моделирование. СПб.: БХВ-Петербург; 2004.
29. Колесов ЮБ, Сениченков ЮБ. Моделирование систем. Практикум по компьютерному моделированию (+ CD-ROM). СПб.: БХВ-Петербург; 2007.
30. Колесов ЮБ, Сениченков ЮБ. Имитационное моделирование сложных динамических систем. URL. http://old.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds_sim.asp
31. Колмогоров АН. Автоматы и жизнь. В кн.: Кибернетика – неограниченные возможности и возможные ограничения. Итоги развития. М.: Наука; 1979:10-29.
32. Коммонер Б. Замыкающийся круг. Природа, человек, технология. Л.: Гидрометеиздат; 1974.
33. Кондратьев КЯ, Крапивин ВФ, Лакаса Х, Савиных ВП. Глобализация и устойчивое развитие: экологические аспекты. Введение. СПб.: Наука; 2006.
34. Кондратьев КЯ, Крапивин ВФ, Савиных ВП. Перспективы развития цивилизации: многомерный анализ. М.: Логос; 2003.
35. Коросов АВ. Имитационное моделирование в среде MS Excel (на примерах из экологии). Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ; 2002.
36. Костицын ВА. Эволюция атмосферы, биосферы и климата. М.: Наука; 1984.
37. Котляков ВМ. Избранные сочинения. Кн. 3. География в меняющемся мире. М.: Наука; 2001.
38. Котляков ВМ, Трофимов АН, Селиверстов ЮП, Солодуха НМ. Моделирование экологических ситуаций. Изв. РАН, сер. геогр. 1995;(1):5-20.
39. Крапивин ВФ. О теории живучести сложных систем. М.: Наука; 1978.
40. Крапивин ВФ. Экоинформатика и проблемы глобальной экодинамики. Биосфера. 2011;3(1):27-37.
41. Крапивин ВФ, Кондратьев КЯ. Глобальные изменения окружающей среды: экоинформатика. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2002.
42. Крапивин ВФ, Свирежев ЮМ, Тарко АМ. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов. М.: Наука; 1982.
43. Ляпунов АА, Титлянова АА. Системный подход к изучению обменных процессов в биогеоценозе. Ботан журн. 1974;59(8):1081-92.
44. Медоуз Д, Рандерс Й, Медоуз Д. Пределы роста. 30 лет спустя. М.: ИКЦ «Академкнига»; 2008.
45. Мейен СВ. Проблема редуccionизма в биологии. В кн.: Диалектика развития в природе и научном познании: (К 100-летию книги Ф. Энгельса «Анти-Дюринг»). М.: Наука; 1978. с. 135-69.
46. Моисеев НН. Имитационные модели. В кн.: Наука и человечество. М.: Знание; 1973. с. 259-69.
47. Моисеев НН. Математик задает вопросы... (Приглашение к диалогу). М.: Знание; 1975.
48. Моисеев НН. Проблемы построения «мировой модели». В кн.: Число и мысль. М.: Знание; 1977. с. 139-75.
49. Моисеев НН. «Мировая динамика» Форрестера и актуальные вопросы экологической эволюции. В кн.: Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Наука; 1978. с. 149-65.
50. Моисеев НН. Системный анализ динамических процессов биосферы: Системный анализ и математические модели. Вестн АН СССР. 1979;(1):97-108.
51. Моисеев НН. Математические задачи системного анализа. М.: Наука; 1981.
52. Моисеев НН. Комментарии к «Эволюции биосферы» В.А. Костицына. В кн.: Костицын В.А.

- Эволюция атмосферы, биосферы и климата. М.: Наука; 1984. с. 46-96.
53. Моисеев НН. Судьба цивилизации. Путь разума. М.: Язык русской культуры; 2000.
 54. Моисеев НН, Александров ВВ, Тарко АМ. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука; 1985.
 55. Моисеев НН, Крапивин ВФ, Свиричев ЮМ, Тарко АМ. На пути к построению модели динамических процессов в биосфере. Вестн. АН СССР. 1979;(10):88-104.
 56. Международная комиссия по окружающей среде и развитию (МКОСР). Наше общее будущее. М.: Прогресс; 1989.
 57. Осипов ГВ, Лисичкин ВА. Глобальные модели развития человечества. Учебное пособие. М.: НормаИнфра; 2015.
 58. Пархоменко ВП, Тарко АМ. Ядерная зима. Экология и жизнь. 2000;(3):44-7.
 59. Петров КМ. Устойчивое развитие: миф или реальность? Вестн СПбГУ Сер 7. 1995;(4):83-90.
 60. Полетаев ИА. Некоторые математические модели биогеоценозов и замечания о моделировании. В кн.: Математическое моделирование жизненных процессов. М.: Мысль; 1968. с. 124-35.
 61. Разумовский ОС. Три подводных камня концепции устойчивого развития человечества. 1997. https://www.philosophy.nsc.ru/site/journals-old/humscience/1_97/01_razum.htm
 62. Розенберг АГ. Комментарий к статье Роберта Костанцы с соавторами (Nature, 1997). Самарская Лука. 2011;20(1):184-93.
 63. Розенберг АГ. Оценка экосистемных услуг для территории Волжского бассейна (первое приближение). В кн.: Экологический сборник 3: Труды молодых ученых Поволжья. Тольятти: Кассандра; 2011. с. 206-10.
 64. Розенберг АГ. Оценки экосистемных услуг Самарской области. Поволжский экологический журн. 2014;(1):139-45.
 65. Розенберг АГ. Экосистемные услуги районов Самарской области (оценка по методу Р. Костанцы). Вестн Самар гос эконом ун-та. 2015;7(129):55-9.
 66. Розенберг ГС. Модели в фитоценологии. М.: Наука; 1984.
 67. Розенберг ГС. Волжский бассейн: на пути к устойчивому развитию. Тольятти: Кассандра; 2009.
 68. Розенберг ГС. Введение в теоретическую экологию. Тольятти: Кассандра; 2013.
 69. Розенберг ГС, Гелашвили ДБ, Евланов ИА. Устойчивое развитие Волжского бассейна: миф – утопия – реальность. Тольятти: ИЭВБ РАН; Кассандра; 2012.
 70. Розенберг ГС, Краснощеков ГП, Крылов ЮМ. Устойчивое развитие: мифы и реальность. Тольятти: ИЭВБ РАН; 1998.
 71. Саранча ДА. Использование точных методов в описательных науках (на эколого-биологических примерах). В кн.: Международная конференция по прикладной математике и информатике, посвященная 100-летию со дня рождения академика А.А. Дородницына (ВЦ РАН, Москва, 7–11 декабря 2010 г.). Тезисы докладов. М.: ВЦ РАН; 2010. с. 201-203.
 72. Свиричев ЮМ. Математические модели биологических сообществ. В кн.: Итоги науки и техники. Математическая биология и медицина. М.: ВИНТИ; 1978. с. 117-65.
 73. Свиричев ЮМ, Александров ГА, Арманд АД. Математические модели экосистем. Экологические и демографические последствия ядерной войны. М.: Наука; 1986.
 74. Сергеев ЮН, Кулеш ВП. Концепция циклического развития цивилизации. Вестн СПбГУ сер 7. 2013;(2):57-70.
 75. Сергеев ЮН, Кулеш ВП. Проблемы циклического и стационарного развития цивилизации в глобальных моделях. Биосфера. 2017;(9):13-47.
 76. Тарко АМ. Глобальная роль системы «атмосфера – растения – почва» в компенсации воздействий на биосферу. ДАН. 1977;237(1):234-7.
 77. Тарко АМ. Модель глобального цикла углерода. Природа. 1994;(7):27-32.
 78. Тарко АМ. Устойчивость биосферных процессов и принцип Ле-Шателье. ДАН. 1995;343(3):393-5.
 79. Тарко АМ. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. М.: Физматлит; 2005.
 80. Тарко АМ, Кузнецова МВ. Пространственно распределенная модель глобального цикла углерода в биосфере. Математическое моделирование. 2001;13(9):45-54.
 81. Урсул АД, Романович АЛ. ВСУР в Йоханнесбурге. Устойчивое развитие. Наука и практика. 2003;(1):71-7.
 82. Флейшман БС. Системные методы в экологии. В кн.: Статистические методы анализа почв, растительности и их связи. Уфа: ИБ БФАН СССР; 1978. с. 7-28.
 83. Флейшман БС, Брусиловский ПМ, Розенберг ГС. О методах математического моделирования сложных систем. В кн.: Системные исследования. Методологические проблемы. М.: Наука; 1982. с. 65-79.
 84. Форрестер Д. Основы кибернетики предприятия (Индустриальная динамика). М.: Прогресс; 1971.

85. Форрестер Д. Динамика развития города. М.: Прогресс; 1974.
86. Форрестер Д. Мировая динамика. М.: Наука; 1978.
87. Хеджпет ДВ. Модели в экологии и путаница вокруг них (некоторые философские соображения). Биология моря. 1978;(6):3-15.
88. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир; 1978.

Общий список литературы/Reference List

1. Aleksandrov VV, Moiseyev NN. [Nuclear conflict in the eyes of climatologists and mathematicians]. Vestn AN SSSR. 1984;(11):65-76. (In Russ.)
2. Aleksandrov VV, Stenchikov GL. [On the global aftermath of nuclear war]. Vychislit Matemat Mat Fizika. 1984;(1):140-3. (In Russ.)
3. Aleksandrova VD. [On modeling in phytocenology]. Botan Zhurn. 1970;55(3):369-75. (In Russ.)
4. Bartsev SI, Degermendzhi AG, Yerokhin DV. [A minimal global model of long-term carbon changes in the biosphere]. DAN. 2005;401(2):233-37. (In Russ.)
5. Bartsev SI, Degermendzhi AG, Ivanova YD, Shchemel AL. [The effect of indeterminacy in the estimates of the parameters of a minimal biospheric model on the prognosis of biospheric changes]. Izv Samar Nauch Tsentr RAN. 2009;11(7):1413-8. (In Russ.)
6. Bellman R. Dinamicheskoye Programirovaniye. Moscow: Izd-vo Inostrnoy Literatury; 1960. (In Russ., transl. from Eng.)
7. Belolipetskiy VM, Shokin YI. Matematicheskoye Modelirovaniye v Zadachah Ohrany Okruzhayushchey Sredy. Novosibirsk: INFOLIO-Press; 1997. (In Russ.)
8. Beliyev VI. Teoriya Slozhnykh Geosistem. Kiev: Naukova Dumka; 1978. (In Russ.)
9. Beliyev VI. Matematicheskoye Modelirovaniye Ekosistem Morey i Okeanov. In: Itogi Nauki i Tekhniki. Obshchaya Ekologiya, Biotsenologiya, Gidrobiologiya. Moscow: VINITI. 1980; 7-83. (In Russ.)
10. Bobylev SN. Podmoskovnyye Pozhary i Johannesburg; 2002. http://fire.nad.ru/2002/10_18_expert.htm (In Russ.)
11. Bobylev SN, Girusov EV, Perelet RA. Ekonomika Ustoychivogo Razvitiya. Moscow: Stupeni; 2004. (In Russ.)
12. Bruks FP. Kak Proyektiruyutsia i Sozdayutsia Programmnye Kompleksy. Mificheskii Cheloveko-Mesiats. Ocherki po Sistemnomu Programirovaniyu. Moscow: Nauka; 1979. (In Russ., transl. from Eng.)
13. Brusilovskiy PM, Kozhova OM. Problemy Prognozirovaniya Sostoyaniya Ekosistem. In: Priyomy Prognozirovaniya Ekologicheskikh Sistem. Novosibirsk: Nauka; 1985. p. 15-23. (In Russ.)
14. Budushcheye, Kotorogo my Khotim: Itogovy Dokument Konferentsii OON. Rio-de-Zhaneiro; 2012. http://www.iblfrussia.org/a-conf.216-1-1_russian.pdf. (In Russ.)
15. Buslenko NP. Avtomatizatsiya Imitatsionnogo Modelirovaniya Slozhnykh Sistem. Moscow: Nauka; 1977. (In Russ.)
16. Buslenko NP. Modelirovaniye Slozhnykh Sistem. Moscow: Nauka; 1978. (In Russ.)
17. Voronin AA. [Sustainable development: A myth or the reality?] Matematicheskoye Obrazovaniye. 2000;1(12):59-67. (In Russ.)
18. Heisenberg V. Fizika i Filosofiya. Chast i Tseloye. M.: Nauka; 1989. (In Russ., transl. from Eng.)
19. Gelovani VA, Yegorov VA, Mitrofanov VB. [The solution of a control problem in the Forrester's global model]. Preprint IMP AN SSSR. Moscow; 1974. (In Russ.)
20. Gelovani VA, Yegorov VA, Mitrofanov VB. [On a control problem in Forrester's global model]. DAN SSSR. 1975;220(3):137-40. (In Russ.)
21. Gelovani VA, Yegorov VA, Mitrofanov VB, Piontkovskiy AA. [Investigation into effect of control on the Forrester's global model]. Problemy Kibernetiki. 1976;31:187-224. (In Russ.)
22. Gorstko AB. [Simulation modeling]. Izv SKNTs VSh Ystestv Nauki. 1977;(2):12-20. (In Russ.)
23. Gorstko AB, Epshteyn LV. [Azov Sea simulation system: An instrument for analysis and prognosis]. In: Matematicheskoye Modelirovaniye Vodnykh Ekologicheskikh Sistem. Irkutsk: Irkutskiy Universitet; 1978. p. 47-58. (In Russ.)
24. Danilov-Danilyan VI, Losev KS. Ekologicheskii Vyzov i Ustoychivoye Razvitiye. Moscow: Progress-Traditsiya; 2000. (In Russ.)
25. Zalikhanov MCh. [A resumé of the parliamentary section of Rio+10]. Nauka i Praktika. 2003;(1):23-29. (In Russ.)
26. Zaslavskiy BG, Poluektov RA. Upravlenie Ekologicheskimi Sistemami. Moscow: Nauka; 1988.
27. Zakharov VM. [Ecology and economics: Current developmental priorities]. Vestn Samar Gos Ekonom Univ. 2014;(Special Issue):7-14. (In Russ.)
28. Kelton VD, Lou AM. Imitatsionnoye Modelirovaniye. Saint Petersburg: BHV-Peterburg; 2004. (In Russ., transl. from Eng.)
29. Kolesov YB, Senichenkov YB. Modelirovaniye Sistem. Praktikum po Kompyuternomu Modelirovaniyu (+ CD-ROM). Saint Petersburg: BHV-Peterburg; 2007. (In Russ.)
30. Kolesov YB, Senichenkov YB. Imitacionnoye modelirovaniye slozhnykh dinamicheskikh sistem.

- URL. http://old.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds_sim.asp. (In Russ.)
31. Kolmogorov AN. [Automata and the Life]. In: Kibernetika – Neogranichennye Vozmozhnosti i Vozmozhnye Ogranicheniya. Itogi Razvitiya. M.: Nauka; 1979. p. 10-29. (In Russ.)
 32. Kommoner B. Zamykayushchiysia Krug. Priroda, Chelovek, Tekhnologiya. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1974. (In Russ.)
 33. Kondratyev KY, Krapivin VF, Lakasa H, Savinykh VP. Globalizatsiya i Ustoychivoye Razvitiye: Ekologicheskiye Aspekty. Vvedeniye. Saint Petersburg: Nauka; 2006. (In Russ.)
 34. Kondratyev KY, Krapivin VF, Savinykh VP. Perspektivy Razvitiya Tsivilizatsii: Mnogomernyi Analiz. Moscow: Logos; 2003. (In Russ.)
 35. Korosov AV. Imitatsionnoye Modelirovaniye v Srede MS Excel (na Primerah iz Ekologii). Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU; 2002. (In Russ.)
 36. Kostitsyn VA. Evoliutsiya Atmosfery, Biosfery i Klimata. Moscow: Nauka; 1984. (In Russ.)
 37. Kotliakov VM. Izbrannye Sochineniya. Kn. 3. Geografiya v Meniyushchemsia Mire. Moscow: Nauka; 2001. (In Russ.)
 38. Kotliakov VM, Trofimov AN, Seliverstov YP, Solodukha NM. [Modeling of ecological situations]. Izv RAN Ser Geogr. 1995;(1):5-20. (In Russ.)
 39. Krapivin VF. O Teorii Zhivuchesti Slozhnykh Sistem. Moscow: Nauka; 1978. (In Russ.)
 40. Krapivin VF. [Ecoinformatics and problems in global ecodynamics]. Biosfera. 2011;3:27-37. (In Russ.)
 41. Krapivin VF, Kondratyev KY. Globalnye Izmeneniya Okruzhayushchey Sredy: Ekoinformatika. Saint Petersburg: SPbGU; 2002. (In Russ.)
 42. Krapivin VF, Svirezhev YM, Tarko AM. Matematicheskoye Modelirovaniye Globalnykh Biosfernykh Protseessov. Moscow: Nauka; 1982. (In Russ.)
 43. Liapunov AA, Titlianova AA. [A systems approach to studies of fluxes in a biogeocenosis]. Botan Zhurn. 1974;59(8):1081-92. (In Russ.)
 44. Medouz D, Randers J, Medouz D. Predely Rosta 30 Let Spustia. Moscow: Akademkniga; 2008. (In Russ., transl. from Eng.)
 45. Meyen SV. [The problem of reductionism in biology]. In: Dialektika Razvitiya v Prirode i Nauchnom Poznani. Moscow: Nauka; 1978. p. 135-69. (In Russ.)
 46. Moiseyev NN. [Simulation models]. In: Nauka i Chelovechestvo. Moscow: Znaniye; 1973. p. 259-69. (In Russ.)
 47. Moiseyev NN. Matematik Zadayot Voprosy (Priglaseniye k Dialogu). Moscow: Znaniye; 1975. (In Russ.)
 48. Moiseyev NN. [Problems in developing a „world model”. In.: Chislo i Mysl. Moscow: Znaniye; 1977. p. 139-75. (In Russ.)
 49. Moiseev NN. [Forrester’s „world denamics” and urging questions of environmental evolution]. In: Forrester J. Mirovaya Dinamika. Moscow: Nauka; 1978. p. 149-65. (In Russ.)
 50. Moiseyev NN. [Systems analysis of dynamic processes in the biosphere: Systems analysis and mathematical models]. Vestn AN SSSR. 1979;(1):97-108. (In Russ.)
 51. Moiseyev NN. Matematicheskiye Zadachi Sistemnogo Analiza. Moscow: Nauka; 1981. (In Russ.)
 52. Moiseyev NN. [Comments to the book „Evolution of the Biosphere” by VA Kostitsyn]. In: Kostitsyn VA. Evoliutsiya Atmosfery, Biosfery i Klimata. Moscow: Nauka; 1984. p. 46-96. (In Russ.)
 53. Moiseyev NN. Sudba Tsivilizatsii. Put’ Razuma. Moscow: Yazyki Russkoy Kultury; 2000. (In Russ.)
 54. Moiseyev NN, Aleksandrov VV, Tarko AM. Chelovek i Biosfera. Opyt Sistemnogo Analiza i Eksperimenty s Modeliami. Moscow: Nauka; 1985. (In Russ.)
 55. Moiseyev NN, Krapivin VF, Svirezhev YM, Tarko AM. [Towards developing a model of dynamic processes in the biosphere]. Vestn AN SSSR. 1979;(10):88-104. (In Russ.)
 56. Mezhdunarodnaya Komissiya po Okruzhayushchey Srede i Razvitiyu (MKOSR). Nashe Obshcheye Budushcheye. Moscow: Progress; 1989. (In Russ., transl. From Eng.)
 57. Osipov GV, Lisichkin VA. Globalnye Modeli Razvitiya Chelovechestva Uchebnoye Posobiye. Moscow: NormaInfra; 2015. (In Russ.)
 58. Parkhomenko VP, Tarko AM. [The nuclear winter]. Ekologiya i Zhizn. 2000;(3):44-7. (In Russ.)
 59. Petrov KM. [Sustainable development: A myth or the reality?]. Vestn SPbGU Ser 7. 1995;(4):83-90. (In Russ.)
 60. Poletayev IA. [Some mathematical models of biogeocenoses and remarks on modeling]. In: Matematicheskoye Modelirovaniye Zhiznennykh Protseessov. Moscow: Mysl; 1968. p. 124-35. (In Russ.)
 61. Razumovskiy OS. Tri Podvodnykh Kamnia Konceptsii Ustoychivogo Razvitiya Chelovechestva. 1997. https://www.philosophy.nsc.ru/site/journals-old/humscience/1_97/01_razum.htm. (In Russ.)
 62. Rozenberg AG. [Comments on the paper by Robert Kostancy et al. (Nature, 1997)]. Samarskaya Luka 2011;20(1):184-93. (In Russ.)
 63. Rozenberg AG. [An estimate of environmental services for Volga Basin area (the first approxima-

- tion)]. In: *Ekologicheskiy Sbornik 3: Trudy Molo-dykh Uchenykh Povolzhya*. Tolyatti: Cassandra; 2011. p. 206-10. (In Russ.)
64. Rozenberg AG. [An estimate of environmental services in Samara Oblast]. *Povolzhskiy Ekologicheskiy Zhurn.* 2014;(1):139-45. (In Russ.)
 65. Rozenberg AG. [Ecosystem services in Samara Oblast districts (estimates according to R. Kostancy)]. *Vestn Samar Gos Ekonom Univ.* 2015;(7):55-9. (In Russ.)
 66. Rozenberg GS. *Modeli v Fitotsenologii*. Moscow: Nauka; 1984. (In Russ.)
 67. Rozenberg GS. *Volzhskiy Basseyn: Na Puti k Ustoychivomu Razvitiyu*. Tolyatti: Cassandra; 2009.
 68. Rozenberg GS. *Vvedeniye v Teoreticheskuyu Ekologiyu*. Tolyatti: Cassandra; 2013. (In Russ.)
 69. Rozenberg GS, Gelashvili DB, Yevlanov IA. *Ustoychivoye Razvitiye Volzhskogo Basseyna: Mif – Utopiya – Realnost'*. Tolyatti: Cassandra; 2012. (In Russ.)
 70. Rozenberg GS, Krasnoshchekov GP, Krylov YM. *Ustoychivoye Razvitiye: Mify i Realnost'*. Tolyatti: IEVB RAN; 1998. (In Russ.)
 71. Sarancha DA. [Using exact methods in descriptive sciences exemplified with ecology and biology]. In: *Mezhdunarodnaya Konferentsiya po Prikladnoy Matematike i Informatike, Tezisy Dokladov*. Moscow: VTs RAN; 2010. p. 201-3. (In Russ.)
 72. Svirezhev YM. [Mathematical models of biological communities]. In: *Itogi Nauki i Tekhniki. Matematicheskaya Biologiya i Meditsyna*. Moscow: VINITI; 1978. p. 117-65. (In Russ.)
 73. Svirezhev YM, Aleksandrov GA, Armand AD. *Matematicheskiye Modeli Ekosistem. Ekologicheskiye i Demograficheskiye Posledstviya Yadernoy Voyny*. Moscow: Nauka; 1986. (In Russ.)
 74. Sergeyev YN, Kulesh VP. [A concept of cyclical development of the civilization]. *Vestn SPbGU ser 7.* 2013;(2):57-70.
 75. Sergeyev YN, Kulesh VP. [Cyclic and stationary modes of the development of civilization in global models]. *Biosfera.* 2017;(9):13-47.
 76. Tarko AM. [The global role of the system atmosphere-plants-soil in compensations for impacts on the biosphere]. *DAN.* 1977;237(1):234-7. (In Russ.)
 77. Tarko AM. [Global carbon cycle models]. *Priroda.* 1994;(7):27-32.
 78. Tarko AM. [The stability of biospheric processes and the Le Chatelier principle]. *DAN.* 1995;343(3):393-5. (In Russ.)
 79. Tarko AM. *Antropogennyye Izmeneniya Globalnykh Biosfernykh Protssosov. Matematicheskoye Modelirovaniye*. Moscow: Fizmatlit; 2005. (In Russ.)
 80. Tarko AM, Kuznetsova MV. [A spatially distributed model of global carbon cycle in the biosphere]. *Matematicheskoye Modelirovaniye.* 2001;13(9):45-54. (In Russ.)
 81. Ursul AD, Romanovich AL. [Sustainable Development World Summit in Johannesburg]. *Nauka i Praktika.* 2003;(1):71-7. (In Russ.)
 82. Fleyshman BS. [Systems methods in ecology]. In: *Statisticheskkiye Metody Analiza Pochv, Rastitelnosti i Ikh Sviazi*. Ufa: IB BFAN SSSR; 1978:7-28. (In Russ.)
 83. Fleyshman BS, Brusilovskiy PM, Rozenberg GS. [On methods for the mathematical modeling of complex systems]. In: *Sistemnyye Issledovaniya. Metodologicheskiye Problemy*. M.: Nauka; 1982. p. 65-79. (In Russ.)
 84. Forrester J. *Osnovy Kibernetiki Predpriyatiya (Industrialnaya Dinamika)*. M.: Progress; 1971. (In Russ., transl. from Eng.)
 85. Forrester J. *Dinamika Razvitiya Goroda*. Moscow: Progress; 1974. (In Russ., transl. from Eng.)
 86. Forrester J. *Mirovaya Dinamika*. Moscow: Nauka; 1978. (In Russ., transl. from Eng.)
 87. Hedzhpel DV. [Model in ecology and the mess around them (some philosophical thoughts)]. *Biologiya Morya.* 1978;(6):3-15. (In Russ.)
 88. Shannon R. *Imitatsionnoye Modelirovaniye Sistem – Iskustvo i Nauka*. Moscow: Mir; 1978. (In Russ., transl. from Eng.)
 89. Bartsev SI, Degermendzhi AG, Erokhin DV. Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics. *Ecol Modelling.* 2008;216(2):160-71.
 90. Bellman RE. *Dynamic Programming*. N.Y.: Dover Publishers; 2003.
 91. Bossel H. *Modeling and Simulation*. Vieweg Braunschweig; 1994.
 92. Brooks FP Jr. *The Mythical Man-Month (Essays on Software Engineering)*. N.Y.: Addison-Wesley Professional; 1995.
 93. Budyko MI, Golitsyn GS, Izrael YA. *Global Climatic Catastrophes*. N.Y.: Springer; 1988.
 94. Bunnell FL. Theological ecology or models and real world. *Forest Chron.* 1973;49(1):167-71.
 95. Costanza R, Daly HE. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biol.* 1992;6:37-46.
 96. Costanza R, d'Arge R, de Groot R. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature.* 1997;387:253-60.
 97. Degermendzhi A, Bartsev S, Erokhin D. Forecast of biosphere dynamics using small-scale models. In: *ECCEM'07: The 6th European Conference on Ecological Modelling «Challenges for Ecological Modelling in a Changing World: Global Chang-*

- es, Sustainability and Ecosystem Based Management», Trieste (Italy). November, 27-30, 2007. Trieste (Italy): Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale; 2007:137-8.
98. Fath B, Jorgensen S.E. *Fundamentals of Ecological Modelling. Applications in Environmental Management and Research*. Amsterdam: Elsevier; 2011.
 99. Forrester JW. *Industrial Dynamics*. Waltham (MA): Pegasus Communications; 1961.
 100. Forrester JW. *Urban Dynamics*. Waltham (MA): Pegasus Communications; 1969.
 101. Forrester JW. *World Dynamics*. Waltham (MA): Pegasus Communications; 1971.
 102. Forrester JW. *Collected Papers of Jay W. Forrester*. Waltham (MA): Pegasus Communications; 1975.
 103. Forrester JW. System dynamics and the lessons of 35 years. In: *The Systemic Basis of Policy Making in the 1990s*. Massachusetts: Sloan School of Management MIT; 1991.
 104. Forrester JW. *System Dynamics: the Foundation under Systems Thinking [HTML format]*. Massachusetts: Sloan School of Management MIT; 1999.
 105. Gelovani VA, Dubovsky SV, Yurchenko VV. Methodological problems in global models. *Simulation*. 1979;33(1):19-23.
 106. Gnauck AH. Time series analysis of water quality data. In: *Process Modelling*. Berlin: Springer; 1999:509-25.
 107. Goodall DW. Building and testing ecosystem models. In: *Mathematical Models in Ecology*. 12th Symp. Oxford: Blackwell Sci. Publ.; 1972:173-94.
 108. Goodall DW. The hierarchical approach to model building. In: *Critical Evaluation of Systems Analysis in Ecosystems Research and Management*. Wageningen: Centre for Agricult. Publ. and Document.; 1976:10-21.
 109. Kershaw KA, Harris GP. Simulation studies in ecology: a simple defined system model. In: *Statistical Ecology*. Philadelphia: Univ. Pennsylvania Press; 1969. Vol. 3, p. 1-21.
 110. Kondratyev KY. *Multidimensional Global Change*. Chichester: Wiley/Praxis; 1998.
 111. Kondratyev KY, Ivlev LS, Krapivin VF, Varotsos CA. *Atmospheric Aerosol Properties: Formation, Processes and Impacts*. Chichester: Springer/Praxis; 2005.
 112. Kondratyev KY, Krapivin VF, Phillips GW. *Global Environmental Change: Modelling and Monitoring*. Heidelberg: Springer; 2002.
 113. Krapivin VF, Kelley JJ. Model-based method for the assessment of global change in a nature/society system. In: *Problems of Global Climatology and Ecodynamics: Anthropogenic Effects on the State of Planet Earth*. Chichester (UK): Springer/PRAXIS; 2008. p. 267-89.
 114. Levins R. *Evolution in Changing Environments*. Princeton (NJ): Princeton Univ. Press; 1968.
 115. Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens III WW. *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. N. Y.: Universe Books; 1972.
 116. Moiseev NN. *Man, Nature and the Future of Civilization: «Nuclear Winter» and the Problem of a «Permissible Threshold»*. Moscow: Novosti Press Agency Pub. House; 1986.
 117. Richardson GP, Pugh AL. *Introduction to System Dynamics Modeling with DYNAMO*. Waltham (MA): Pegasus Communications; 1981.
 118. Robock A, Oman L, Stenchikov GL. Nuclear winter revisited with a modern climate model and current nuclear arsenals: Still catastrophic consequences. *J Geophys Res*. 2007;112:D13107.
 119. Robock A, Oman L, Stenchikov GL. Climatic consequences of regional nuclear conflicts. *Atm Chem Phys*. 2007;7:2003-12.
 120. Shannon RE. *Systems Simulation: The Art and Science*. N. Y.: Prentice Hall; 1975.
 121. Shannon RE. Introduction to the art and science of simulation. In: *Proceedings of 1998 Winter Simulation Conference (WSC '98,)*, December 13-16, 1998. Washington (DC): ACM; 1998:7-14.
 122. Toon OB, Robock A, Turco RP. Consequences of regional-scale nuclear conflicts. *Science*. 2007;315:1224-1225.
 123. Toon OB, Robock A, Turco RP. Environmental consequences of nuclear war. *Physics Today*. 2008;61(12):37-42.
 124. Van Dyne GM. An Overview of the Ecology of the Great Plains Grasslands with Special Reference to Climate and its Impact. Tech. Rept. № 290. N. Y.: Grassland Biome, U. S. Int. Biol. Program; 1975.
 125. Van Dyne GM. Foreword: Perspectives on the ELM model and modelling efforts. In: *Grassland Simulation Model*. N. Y. etc.: Springer-Verlag; 1978:V-XXVI.
 126. Verburg PH, Dearing JA, Dyke JG, Leeuw S, Seitzinger S, Steffene W, Syvitski J. Methods and approaches to modelling the Anthropocene. *Global Environmental Change*. 2016;(39):328-40.
 127. Voinov AA. Paradoxes of sustainability. *Zhurn Obsch Biol*. 1998;59(2):209-218.