

УДК 575.8

ОСНОВАННАЯ НА ВЕРОЯТНОСТНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТАХ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ АНТРОПОСФЕРЫ

В.В. Меншуткин^{1, 2}, В.Ф. Левченко^{2*}

¹Экономико-математический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия;

²Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

* Эл. почта: lew@lew.spb.org

Статья поступила в редакцию 16.10.2017; принята к печати 07.11.2017

В разработанной модели эволюции антропосферы с использованием аппарата стохастических клеточных автоматов учтены состав и миграции населения, макроэкономика, загрязнение окружающей среды, истощение ресурсов и экологическая сознательность населения. Показано, что без коррекции принципов современной природоохранной политики неизбежны катастрофические явления в антропосфере, избежать которых возможно только при повышении экологической сознательности населения. Необходимым инструментом при планировании таких действий является использование компьютерных моделей.

Ключевые слова: антропосфера, клеточные автоматы, охрана природы, макроэкономика.

A STOCHASTIC CELLULAR AUTOMATA-BASED MODEL OF EVOLUTION OF THE ANTHROSPHERE

V.V. Menshutkin^{1, 2}, V.F. Levchenko^{2*}

¹Economico-Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia;

²I.M. Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia

E-mail: lew@lew.spb.org

A model of the evolution of anthroposphere has been developed based on stochastic cellular automata to account of the composition and migration of population, macroeconomic parameters, environmental pollution, resource exhaustion, and the environmental awareness of population. The latter has been shown to be a key factor to be promoted in order to avoid catastrophic consequences of population growth and associated environmental pollution and resource exhaustion.

Keywords: anthroposphere, cellular automata, environmental protection, macroeconomics.

1. Введение

Проблема эволюции антропосферы¹ и прогнозирования этого процесса интересовала ученых, начиная с классических работ Вернадского [1] и кончая современными разработками [6, 10, 13]. Признается, что исследования, а тем более прогнозы динамики такой сложнейшей системы, как биосфера Земли, да еще во взаимодействии с не менее сложной системой

человеческого общества не могут обойтись без компьютерного моделирования [4, 5].

Традиционно при моделировании сложных объектов используются системы дифференциальных уравнений, и их решения находятся с помощью вычислительных машин [7, 14, 17]. Такой подход оправдан при построении моделей наземных или водных экологических систем, но при включении человеческого общества в состав объекта моделирования возникают существенные трудности. Законы непрерывности и сохранения вещества и энергии, используемые при моделировании экосистем, оказываются недостаточными при включении в модель не только экономических, но и соци-

¹ Термин «антропосфера» введен, по-видимому, Д.Н. Анучиным в 1902 г. По Анучину антропосфера – «стадии и формы культуры» человека на поверхности Земли; биосфера – «формы органической жизни на ее поверхности» (Анучин Д.Н. Избранные географические работы. М., 1949).

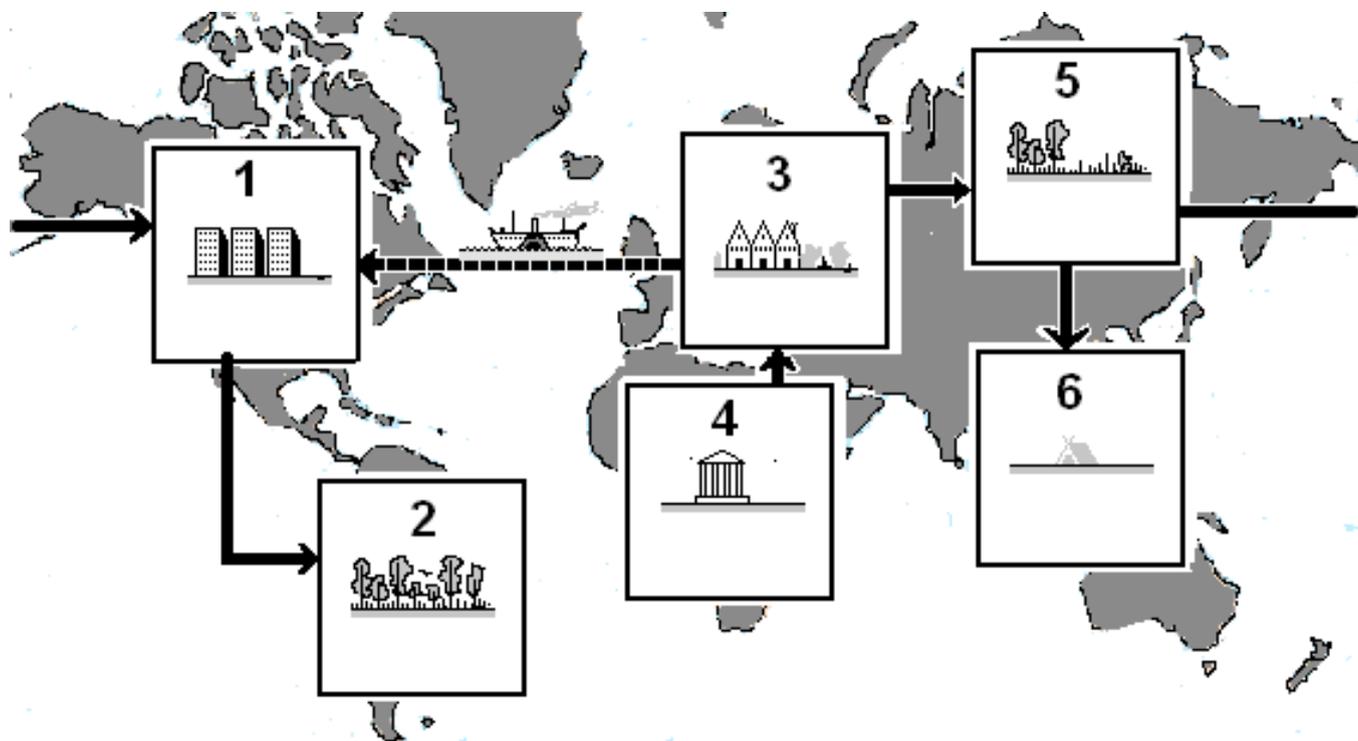


Рис. 1. Схема связей клеточных автоматов в модели антропосферы

альных процессов. В последних существенную роль играют процессы передачи и переработки информации, к которым понятия непрерывности и сохранения неприменимы.

В настоящей работе делается попытка применить к проблеме эволюции антропосферы математический аппарат вероятностных клеточных автоматов [6]. Подобный подход ведет свою историю от моделей, оперирующих не числами, а объектами с изменяющимися свойствами и взаимодействующими друг с другом. Методологические основы такого подхода изложены в работах С. Вольфрама [17]. Примеры приложения аппарата клеточных автоматов для моделирования биосферных процессов можно найти в работах [18–23].

При разработке описанной ниже модели основное внимание было обращено на максимальное упрощение ее конструкции с целью получения не слишком сложных и достаточно обозримых результатов². Этому требовали новизна применяемого математического аппарата

² От редакции. Такого рода модели в зарубежной литературе обозначаются как toy models (игрушечные модели) – см., например: http://philsci-archiv.pitt.edu/12306/1/Toy%20Models_philsci_archive.pdf. Их разработка и исследование, своего рода игра с ними, часто оказываются необходимым этапом на пути построения моделей, более адекватных реальности, которые все равно не отражают ее полностью: некоторыми деталями всегда приходится жертвовать.

и многообразие свойств моделируемого объекта. Опыт создания и попыток использования сложных и громоздких программных продуктов показал низкую эффективность такого подхода. Более реалистичным представляется путь последовательного наращивания сложности моделей одного и того же объекта.

2. Описание модели

Состояние антропосферы Земли описывается в модели шестью ячейками, каждая из которых является вероятностным клеточным автоматом (рис. 1). Эти автоматы условно ассоциируются с выделением регионов Северная Америка (1), Южная Америка (2), Европа (3), Африка (4), Северная часть Азии (5) и Южная часть Азии с Австралией и Океанией (6).

Автоматы связаны между собой основными путями миграции населения (стрелки на рис. 1). Заметим, что прямой путь из Европы в Северную Америку полагается функционирующим только при наличии достаточного уровня развития техники. Путь через Берингов пролив такого условия не требовал.

Каждый автомат состоит из двух частей: человеческая популяция и ее эколого-экономическое окружение. Человеческая популяция предполагается состоящей из отдельных групп людей, которым приписаны

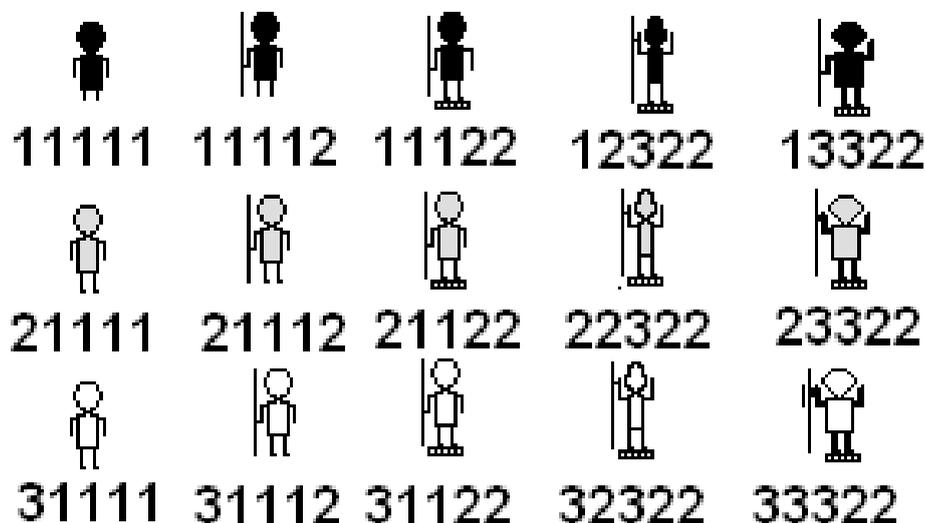


Рис. 2. Кодирование свойств объектов человеческой популяции. Первый символ – цвет, второй – размер, третий – работоспособность, четвертый – уровень экологической сознательности, пятый – пассионарность

одинаковые свойства. В пределе, конечно, следовало бы рассматривать каждого человека в отдельности – примеры таких моделей существуют [6], – но для первого приближения пришлось ограничиться гораздо меньшим разнообразием объектов, своего рода «персонажей». В данном случае максимальное число объектов в автомате составляет 20. Свойства объектов кодируются в виде строки, примеры такого кодирования приведены на рис. 2. Графическое представление свойств объектов преследует только цели наглядности при выводе результатов моделирования на экран дисплея и не имеет никакой связи с реальными антропологическими типами людей.

Объекты обладают возрастом (параметр AGE), который увеличивается на единицу за каждый временной шаг модели. По достижении предельного возраста (AGE-MAX), величина которого зависит от внешних условий, объект гибнет, освобождая место, которое может занять другой объект. Объекты могут размножаться, но только при наличии свободного места. При размножении признаки передаются дочерним объектам.

Признаки объекта могут подвергаться мутациям. Выбор мутирующего объекта случаен и равновероятен внутри каждой ячейки. Выбор мутирующего признака также равновероятен. В случае трех возможных состояний признака (первое, второе и

третье) направление мутации из второго состояния в первое или третье состояние имеет вероятность 0,5. Кроме наследственной передачи информации признаков объектов в модели предусмотрена горизонтальная передача информации по аналогии с тем, что описано в [8].

Состояния всех элементов эколого-экономической части модели описываются дискретными переменными по пятибалльной шкале: 1 – очень мало, 2 – мало, 3 – среднее, 4 – много, 5 – очень много. Такое представление удобно тем, что позволяет в программе моделирующего алгоритма использовать только целые числа и логические операторы, что ускоряет его работу. С другой стороны, это существенно огрубляет представление зависимостей, которые могли бы быть получены в случае величин в виде действительных чисел. На рис. 3 представлена схема связей между переменными, определяющими состояние эколого-экономической части автомата, и человеческой популяцией, характеризующейся общей численностью населения (N) в ячейке автомата. Эта величина может увеличиваться за счет размножения (p_{birth}) и притока мигрантов (p_{mig}). Сокращение численности населения происходит в результате естественной смертности по возрасту (a_{gema}) и в результате загрязнения окружающей среды (p_{mort}).

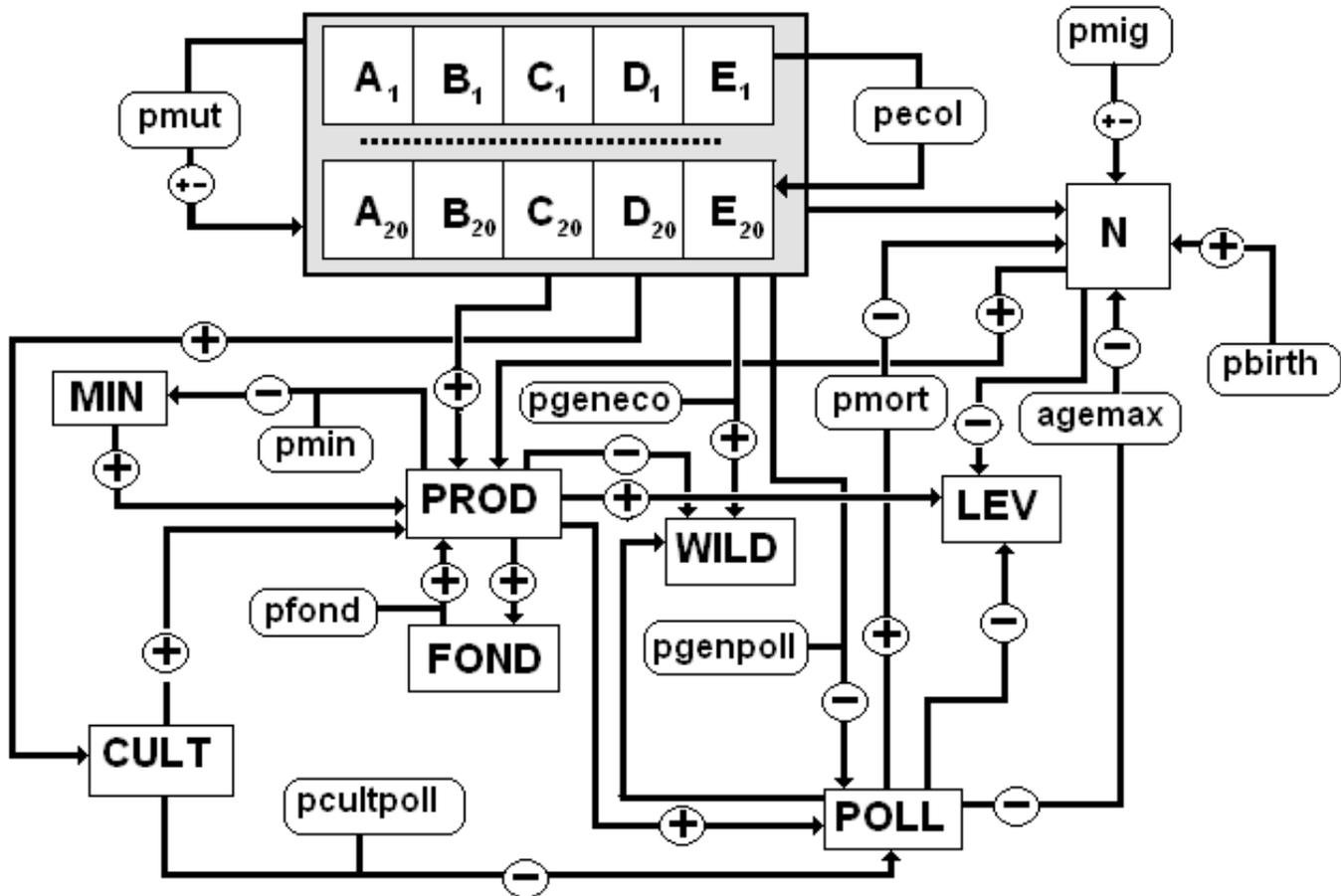


Рис. 3. Схема связей между переменными в эколого-экономической части автомата. Описания переменных (в прямоугольниках) и коэффициентов (в закругленных рамках) приведены в тексте

Суммарная валовая продукция (PROD) зависит от характеристик рабочей силы, то есть определяется сходным образом, как при выводе закона Кобба-Дугласа [9].

Предполагается, что продукция пропорциональна величине N и зависит от производственных фондов (FOND) с учетом развития науки и техники (CULT). При недостаточном развитии высоких технологий валовая продукция ограничивается возможностями использования запасов невозобновляемых ресурсов (MIN), например, нефти и газа. Интенсивность потребления невозобновляемых ресурсов ($pmin$) сокращается по мере их истощения. Величина производственных фондов ($pfond$) связана с валовой продукцией и корректируется уровнем развития науки и техники.

Состояние окружающей среды (нетронутой, «дикой» природы – WILD) ухудшается из-за воздействия производства (PROD), в частности, загрязнений (POLL). Состояние окружающей

среды может быть существенно улучшено при повышении у населения уровня экологической сознательности (E), в результате следования принципам экологической этики (четвертое свойство на рис. 2).

Степень загрязнения среды (POLL), которая напрямую зависит от величины валовой продукции (PROD), может быть снижена после создания очистных сооружений, что косвенно связано со свойством E у населения ячейки. Наличие свойства пассионарности (D) помимо стимуляции миграции способствует интенсификации развития науки и техники (CULT). Повышение уровня для свойства C (работоспособность – третье на рис. 2) вызывает рост и способствует подъему эффективности производства (PROD).

Уровень жизни населения (LEV) определяется отношением валового продукта (PROD) к численности населения ячейки (N) за вычетом штрафных очков, зависящих от уровня загрязнения среды (POLL).

Миграция населения из одной ячейки в другую происходит по путям, указанным стрелками на рис. 1. При таком перемещении предпочтение отдается объектам со свойством пассионарности. Если перемещение происходит в ячейку, еще не заселенную людьми, то переселенцы переносят с собой все свои особенности и достижения в научно-технической и культурной сферах (CULT), в том числе и свой уровень развития производственных фондов (FOND). Если переселение происходит в уже заселенную ячейку, то величина cult задается по максимуму значений для исходной ячейки и ячейки, в которую происходит переселение. В процессе исследования модели схему миграционных потоков можно было изменять, например, введением пути из ячейки 4 в ячейку 1 для имитации процессов завоевания и работорговли.

3. Исследование модели

На рис. 4 показан интерфейс программы на языке Visual Basic 6.0, которая реализует модель.

На правом графике представлена динамика численности населения в каждой ячейке. Начальное состояние модели предусматривало отсутствие человеческого населения во всех ячейках модели за исключением ячейки 4, в которой размещалось 5 объектов с одинаковыми свойствами «11111». Это соответствует гипотезе о том, что первые люди вида *Homo sapiens* появились в Центральной Африке. В исходном состоянии модели во всех ячейках «дикая» природа была практически нетронутой, а полезные ископаемые еще никак не использовались.

В левой верхней части интерфейса (рис. 4) расположено графическое отображение конечного состояния модели (в данном случае – одной из реализаций при $t = 200$). Видно, что в колыбели человечества (ячейка 4) загрязнение природной среды достигло предельного уровня (POLL = 5) при почти нетронутых ископаемых ресурсах (MIN = 3). «Дикая» природа лучше всего сохранилась в ячейках 5 и 2, а вот наука и техника получили наибольшее развитие в ячейках 3 и 4.

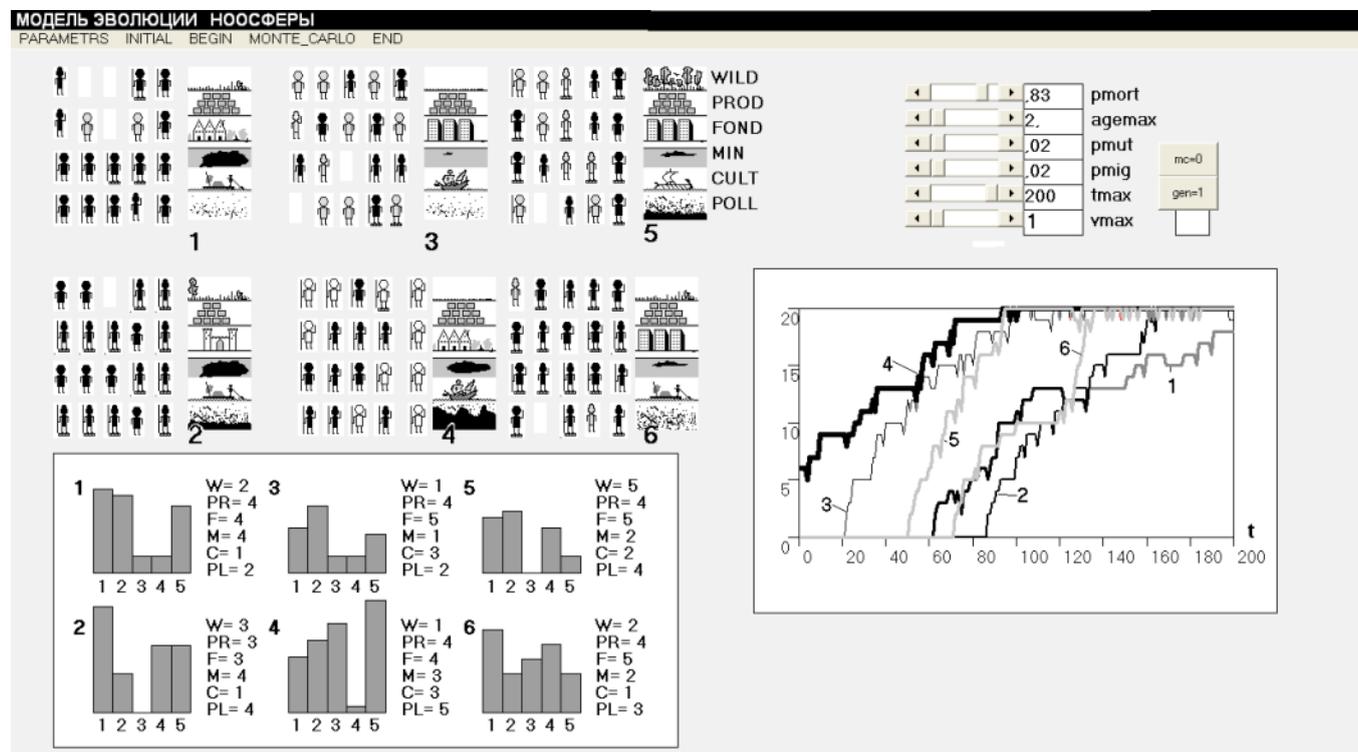


Рис. 4. Интерфейс модели. Главное меню: PARAMETRS – ввод параметров; INITIAL – ввод начального состояния; BEGIN – начало работы; MONTE-CARLO – применение метода Монте-Карло; END – окончание работы. Столбики гистограмм свойств объектов в ячейках: 1 – A = 1; 2 – B = 1; 3 – C = 2; 4 – D = 2; 5 – E = 2 (см. описание этих параметров выше для рис. 2)

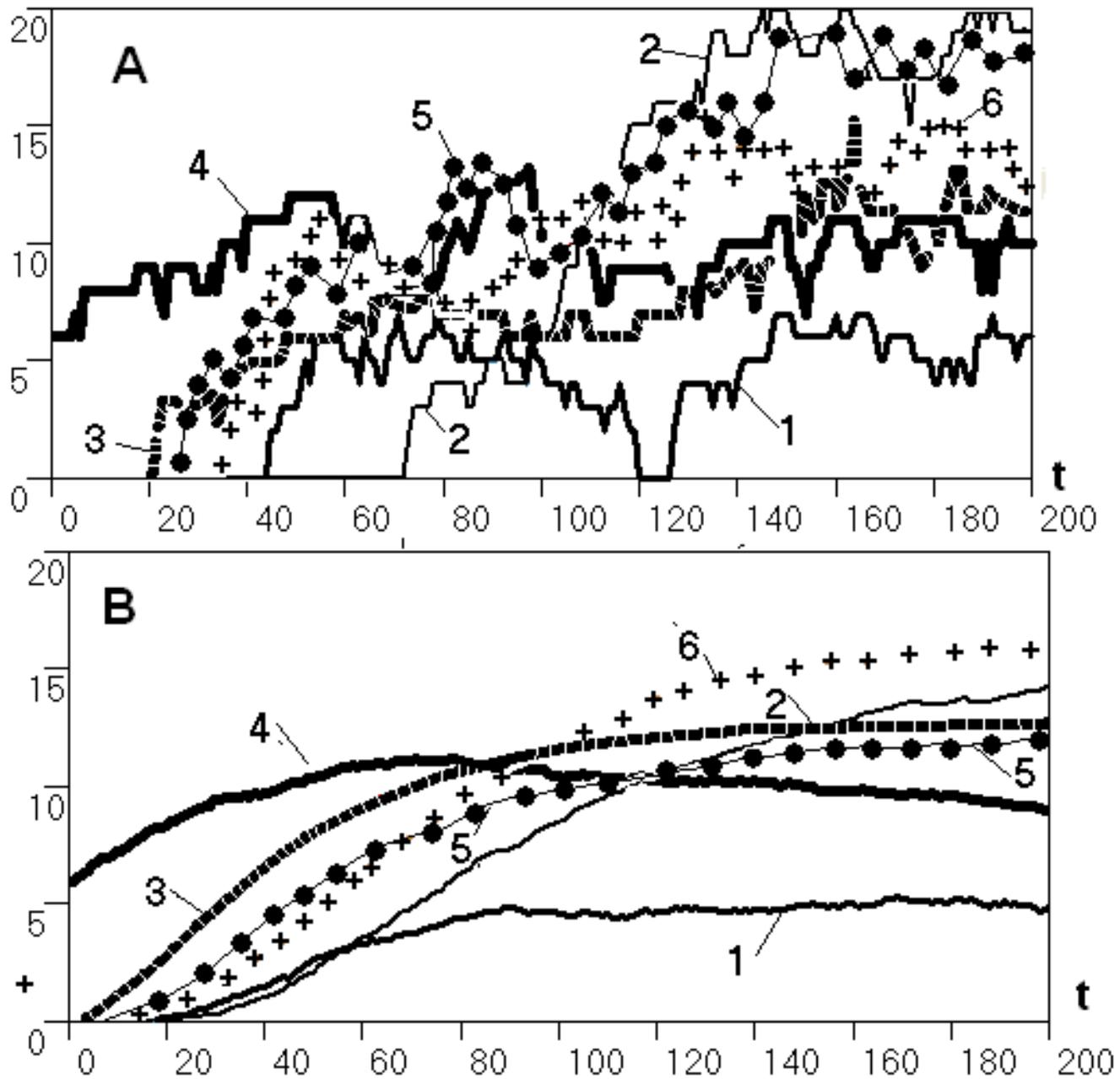


Рис. 5. Динамика численности населения в различных ячейках (нумерация, как на рис. 1). А – одна реализация случайного процесса; В – осреднение по 100 реализациям случайного процесса (метод Монте-Карло)

В левой нижней части интерфейса расположены гистограммы свойств объектов в каждой ячейке. В показанной на рис. 4 реализации случайного процесса объекты со свойством пассионарности $D = 2$ наиболее многочисленны в ячейках 2, 5 и 6, а к охране природы ($E = 2$) более всего расположены жители ячейки 4. Обобщать подобные данные

одной случайной реализации процесса, конечно, не имеет смысла, однако на данном примере можно видеть работоспособность модели и разнообразие эволюционных путей от одинаковых предков. Для получения континуума разных результатов и дальнейшего их обобщения необходимо применение метода Монте-Карло.

Метод Монте-Карло при исследовании стохастических систем заключается в многократном повторении случайного процесса с последующей статистической обработкой всего континуума результатов. Применительно к данной модели такая процедура требует большого объема оперативной памяти компьютера. Использование жесткого диска существенно увеличивает время работы модели. Практически, в описанном варианте конструкции модели работа велась на пределе возможностей обычного персонального компьютера. Дальнейшее усовершенствование модели потребует или переделки моделирующего алгоритма, или применения многопроцессорных вычислительных систем.

На рис. 5 показан пример компьютерного эксперимента при 100 повторениях, что оказалось достаточным для получения устойчивого результата. Сопоставление данных

рис. 5А и рис. 5В показывает, что резкие колебания численности населения в отдельных ячейках нередко являются следствием изменения свойств малого числа объектов. В целом процесс заселения биосферы человеком проходил плавно и равномерно при условии постоянства во времени коэффициентов интенсивности миграций.

Как видно из рис. 5, рост численности населения приводит во всех ячейках к значительному загрязнению окружающей среды (POLL), что существенно снижает уровень жизни населения (LEV). Теоретически возможный способ решения этой проблемы путем искусственного снижения численности людей и сокращения валового продукта представляется нереальным по причинам гуманитарного характера [13]. Остается путь внедрения безотходного производства, существенной или полной очистки бытовых

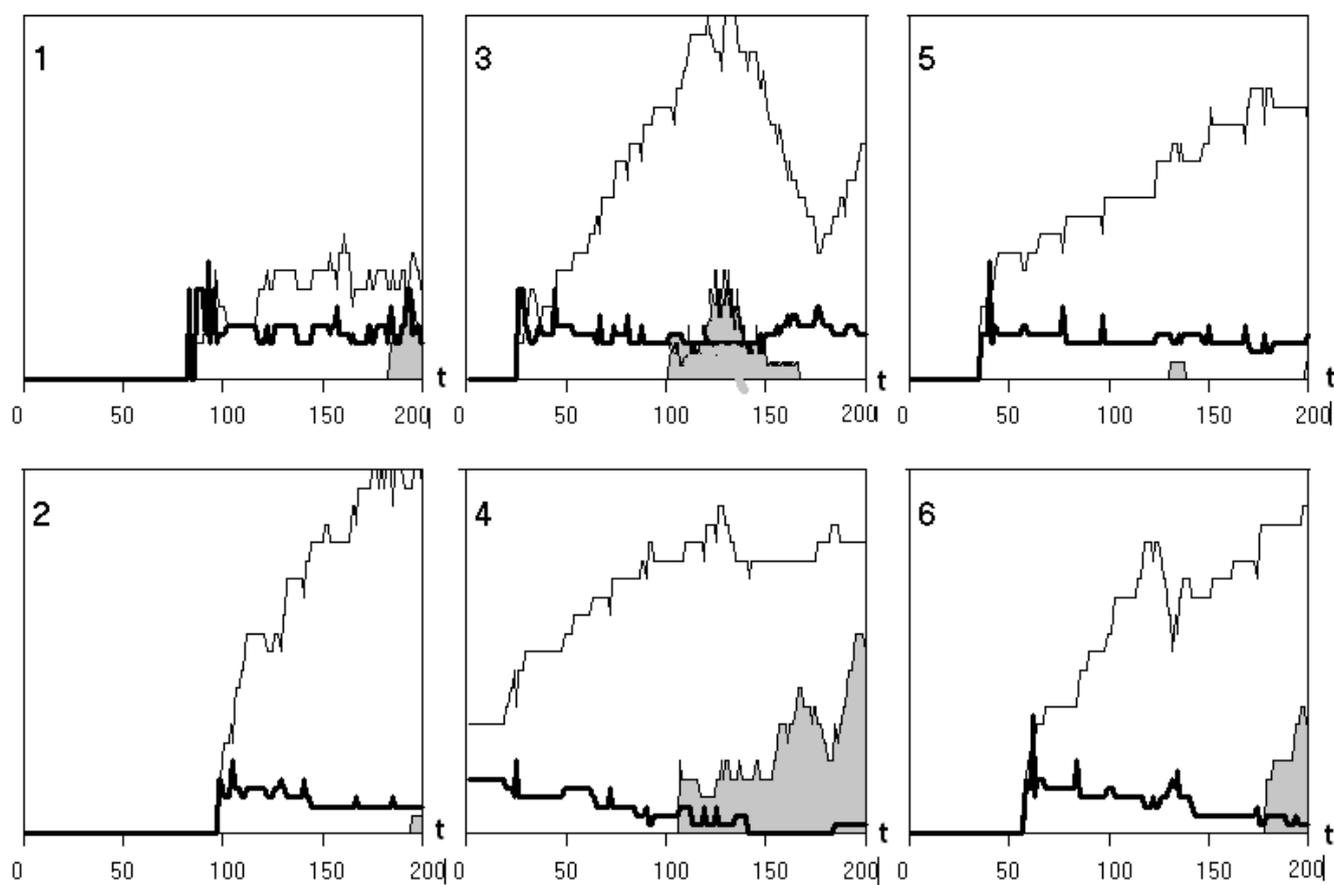


Рис. 6. Условия отсутствия экологического просвещения и природоохранной политики. Динамика численности населения N – тонкая линия, уровень жизни LEV – жирная линия. Заливкой обозначена доля населения, обладающая свойством E – высоким уровнем экологической сознательности

и производственных отходов, а также путь повышения общей экологической культуры населения. В рамках рассматриваемой модели это можно было осуществить путем увеличения у населения свойства E , то есть, по сути, пути распространения среди людей культуры бережного отношения к природе. Доминирование этого свойства в конкретной ячейке не только приводит к уменьшению ущерба для дикой природы (WILD) при росте населения, но и стимулирует к увеличению затрат на очистку отходов при росте валовой продукции (PROD).

Добиться распространения свойства E путем случайных мутаций не представляется возможным, во всяком случае в рамках настоящей модели. Остается путь, подобный так называемому горизонтальному переносу наследственной информации [8]. В данном случае это можно интерпретировать как экологическое

просвещение населения, усовершенствование экологического законодательства и, что особенно важно, практическое выполнение этого законодательства. В предлагаемой модели это интерпретировалось как распространение свойства E путем его прямой передачи от одного объекта к другому, который находится в той же ячейке, но этим свойством не обладает. Описанный процесс происходит с некоторой вероятностью (resol).

С помощью компьютерных экспериментов удалось показать, что реализация рассмотренного выше способа повышения уровня жизни населения при возможном сохранении дикой природы и незагрязненной окружающей среды вполне возможна, поскольку ее деградация происходит очень медленно.

На рис. 6 отображена динамика модели при отсутствии каких-либо воздействий на экологическое мировоззрение населения

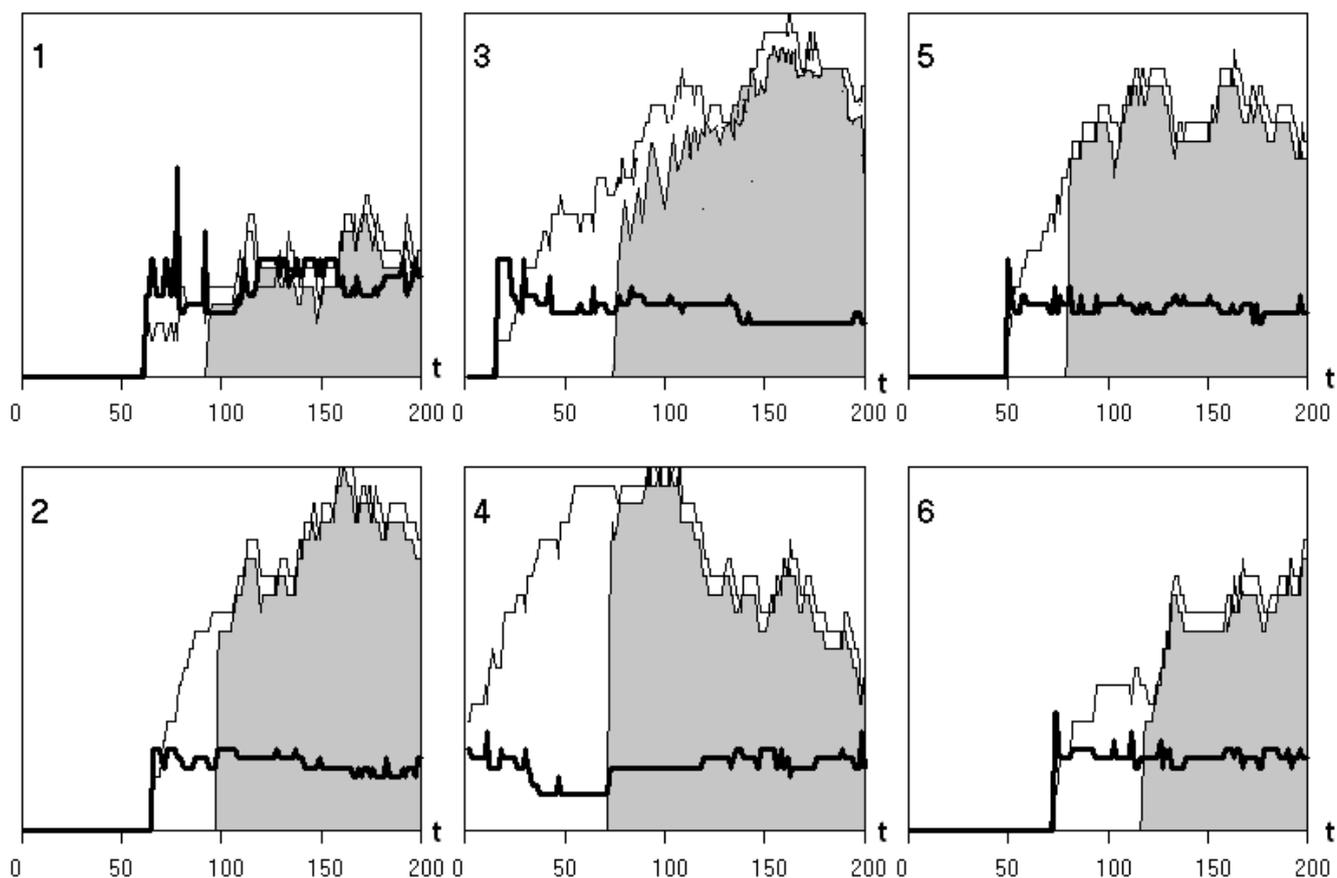


Рис. 7. Условия всеобщего экологического просвещения и активной природоохранной политики. Динамика численности населения N – тонкая линия, уровень жизни LEV – жирная линия. Заливкой обозначена доля населения, обладающая свойством E – высоким уровнем экологической сознательности

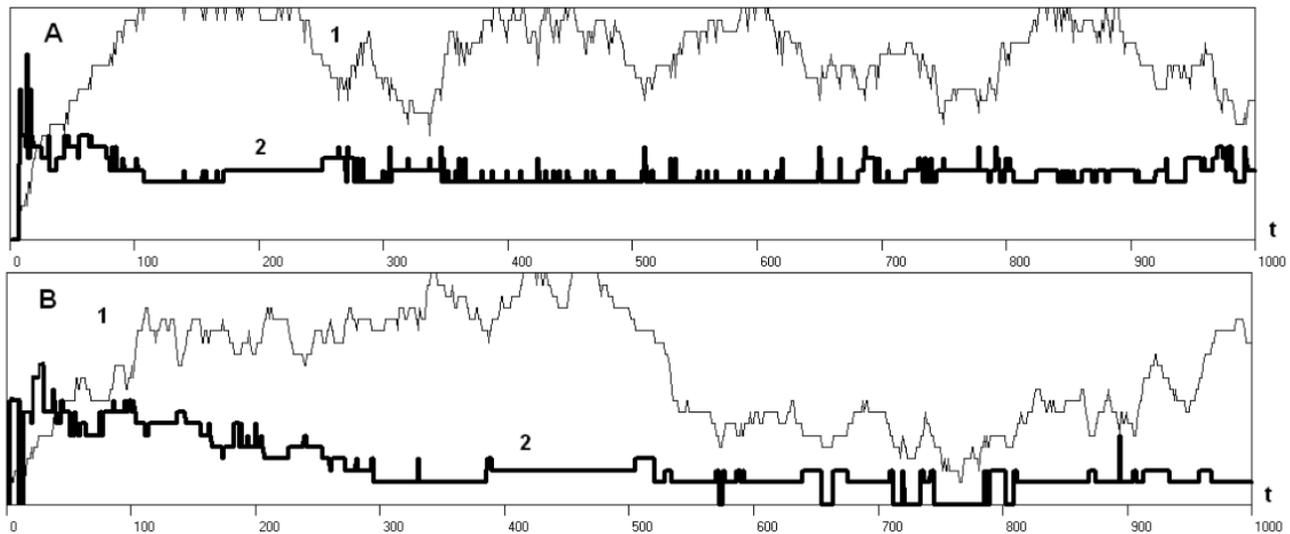


Рис. 8. Динамика численности населения – 1, и уровня жизни – 2, в ячейке 3 при проведении активной природоохранной политики – вариант А, и при отсутствии таковой – вариант В, в продолжении длительного времени

($resol = 0$). В этом случае свойство Е может появиться только в результате случайных мутаций. Действительно, это свойство иногда появлялось и даже захватывало значительную часть населения (ячейка 4), но к существенному улучшению условий жизни это не приводило. Заметим, что при этом наивысший уровень жизни приходится на самое начало освоения новой территории, когда численность населения еще не велика, загрязнение мало, а продукция уже начинает возрастать.

Другая картина наблюдается при проведении активной политики по природоохранному просвещению ($resol = 0,5$) – рис. 7. Здесь свойство Е, появившись в результате мутации, быстро распространяется по большинству населения ячейки. Уровень жизни населения при этом почти вдвое выше, чем в предыдущем эксперименте.

Эффект распространения экологической сознательности наглядно сказывается на больших периодах времени исследования модели – рис. 8. Помимо уже отмеченного различия в уровне жизни населения в рассмотренных вариантах (А и В на рис. 8), отсутствие экологической сознательности (вариант В) приводит и к сокращению численности населения. Это связано с ростом смертности из-за высоких значений уровня загрязнения окружающей среды (POLL). Вариант В может привести так-

же к катастрофическим последствиям, связанным с падением уровня жизни до самых низких значений, – рис. 8.

4. Заключение

Результаты исследования разработанной модели антропосферы ни в коей мере не претендуют на прогнозирование будущего человеческой цивилизации в конкретных регионах планеты. Для этого модель слишком примитивна, число автоматов и объектов, входящих в состав модели, совершенно недостаточно для ответственных выводов и рекомендаций. Однако модель демонстрирует важные тенденции развития социумов при разных внешних условиях и при различной культуре взаимоотношений человека и окружающей его природы. Из модели также следует, что при отсутствии между членами социума «параллельного», негенетического переноса информации об особенностях культуры возникновение социума с высоким уровнем экологического сознания невозможно. Все это косвенно свидетельствует о важности коммуникации (в первую очередь средствами развитого языка) между индивидами.

Другой результат проделанной работы заключается в том, что показана принципиальная возможность создания компьютерной модели столь сложного объекта, как антропосфера. Модели сухопутных и водных экологических

систем, а также демографии и экономики человеческого общества существуют достаточно давно и опробованы в различных условиях [2, 3, 6, 11]. Попытки формального объединения таких моделей в нечто целое не принесли обнадеживающих результатов. Это в значительной мере объясняется большими различиями в математических аппаратах, применяемых при построении этих моделей.

Мы попытались подойти к этой проблеме иначе и применили идеи другого метода моделирования. В принципе, предлагаемый в настоящей работе подход использования вероятностных клеточных автоматов не является совершенно новым. Он уже нашел применение в различных областях знания от изучения турбулентности [12] до генетики челове-

ческих популяций [15]. Однако при изучении эволюции антропосферы он пока еще не применялся.

Исследование созданной модели далеко не исчерпало заложенные в нее возможности. Например, можно изучать воздействие изменения климатических условий на динамику всей системы или эффекты влияния этнических неоднородностей в отдельных частях антропосферы на миграционные и иные процессы в системе. Важным свойством разработанной модели является также возможность увеличения числа автоматов и объектов без изменения конструкции самой модели. В исследуемом варианте количество автоматов ограничивалось только техническими возможностями применяемого компьютера.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Вернадский ВИ. Несколько слов о антропосфере. Усп совр биол. 1944;(18): 113-20.
2. Гуц АК, Коробицин ВВ, Лаптев АА, Паутова ЛА, Фролова ЮВ. Социальные системы. Формализация и компьютерное моделирование. М.: Наука; 1999.
3. Коробицин ВВ. О математическом моделировании этнических процессов. Распространение этнических полей. М.: Gumilevica; 2000.
4. Левченко ВФ. Эволюция биосферы до и после появления человека. СПб.: Наука; 2004.
5. Левченко ВФ. Биосфера: этапы жизни (эволюция частей и целого). СПб.: ISVOE; 2012.
6. Макаров В, Бахтизин АР. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированный подход). М.: Экономика; 2013.
7. Малинецкий ГГ, Махов СА, Посашков СА. Процессы глобализации и компьютерное моделирование. М.: Прогресс; 1994.
8. Марков АВ, Наймарк ЕБ. Эволюция. Классические идеи в свете новых открытий. М.: АСТ; 2016.
9. Матвеев ВД. Макроэкономика. Интенсивный курс. СПб.; 2001.

10. Медоуз ДЧ, Медоуз ДЛ, Рандерс Д. За пределами роста. М.: Прогресс; 1994.
11. Меншуткин ВВ. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск; 2010.
12. Меншуткин ВВ, Филатов НН. Модели Ладожского озера с использованием трехмерных клеточных автоматов. Труды Карельского научного центра РАН. Лимнология. 2017;(3):93-102.
13. Моисеев НН. Человек, среда, общество. Проблемы формализованного описания. М.: Наука; 1982.
14. Моисеев НН, Александров ВВ, Тарко АМ. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука; 1985.
15. Розенберг ГС. Глобальные модели динамики биосферы (к 100-летию со дня рождения НН Моисеева). Биосфера. 2017;9:107-2.
16. Сергеев ЮН, Кулеш ВП. Проблемы цикличности и стационарного развития цивилизации в глобальных моделях. Биосфера. 2017;9:13-7.

Общий список литературы/ Reference List

1. Vernadsky VI. [A few words about the anthroposphere]. Uspekhi Sovremennoy Biologii. 1944;(18):113-20 (In Russ.)

2. Guts AK, Korobitsin VV, Laptev AA, Pautova LA, Frolova YuV. *Sotsialnye Sistemy. Formalizatsiya i Kompyutenoye Modelirovaniye*. [Social Systems. Formalization and Computer Modeling]. Moscow: Nauka; 1999. (In Russ.)
3. Korobitsin VV. *O Matematicheskom Modelirovanii Etnicheskikh Processov. Rasprostraneniye Etnicheskikh Poley*. [On Mathematical Modeling of Ethnic Processes. The Spread of Ethnic Fields]. Moscow: Gumilevica; 2000. (In Russ.)
4. Levchenko VF. *Evolutsiya Biosfery do i posle Poyavleniya Cheloveka*. [Evolution of the Biosphere Before and After the Emergence of Humans]. Saint Petersburg: Nauka; 2004. (In Russ.)
5. Levchenko VF. *Biosfera: Etapy Zhizni (Evolutsiya Chastey i Tselogo)*. [Biosphere: Stages of Life (Evolution of Parts and the Whole)]. Saint Petersburg: ISVOE; 2012. (In Russ.)
6. Makarov V, Bakhtizin AR. *Sotsialnoye Modelirovaniye – Novyi Komyuternyi Proryv (Agent-Orientirovannyi Podkhod)*. [Social Modeling: A New Computer Breakthrough (Agent-based Approach)]. Moscow: Ekonomika; 2013. (In Russ.)
7. Malinetskiy GG, Makhov SA, Posashkov SA. *Protsessy Globalizatsii i Kompyuternoye Modelirovaniye*. [The of Globalization Processes and Computer-assisted Modeling]. Moscow: Progress; 1994. (In Russ.)
8. Markov AV, Neymark EB. *Evolutriaya. Klassicheskiye Idei v Svete Novykh Otkrytiy*. [Evolution. Classical Ideas in the Light of New Discoveries]. Moscow.: AST; 2016. (In Russ.)
9. Matveyenko VD. *Makroekonomika. Intensivnyi Kurs*. [Macroeconomics. Intensive Course]. Saint Petersburg; 2001. (In Russ.)
10. Meadows DCh, Meadows DL, Randers D. *Za Predelami Rosta*. [Beyond the Limits to Growth]. Moscow: Progress; 1994. (In Russ.)
11. Menshutkin VV. *Iskusstvo Modelirovaniya (Ekologiy, Fiziologiya, Evolutsiya)*. [The Art of Modeling (Ecology, Physiology, Evolution)]. Petrozavodsk; 2010. (In Russ.)
12. Menshutkin VV, Filatov NN. [Models of Ladoga Lake using three-dimensional cellular automata]. *Trudy Karelskogo Nauchnogo Tsentra RAN. Limnologiya*. 2017;(3):93-102. (In Russ.)
13. Moiseyev NN. *Chelovek, Sreda, Obschestvo. Problemy Formalizovannogo Opisaniya*. [The Human, the Environment, and the Society. Problems of a Formalized Description]. Moscow: Nauka; 1982. (In Russ.)
14. Moiseyev NN, Aleksandrov VV, Tarko AM. *Chelovek i Biosfera. Opyt Sistemnogo Analiza i Eksperimenty s Modeliami*. [Humans the Biosphere. An Experience in Systems Analysis and Experiments with Models]. Moscow: Nauka; 1985. (In Russ.)
15. Rozenberg GS. [Global models of the dynamics of the biosphere (a review dedicated to Nikita N. Moiseyev's birth centenary)]. *Biosfera*. 2017;9:107-22. (In Russ.)
16. Sergeyev YuN, Kulesh VP. [Cyclic and stationary modes of the development of civilization in global models]. *Biosfera*. 2017;9:13-7. (In Russ.)
17. Wolfram S. *A new kind of science*. USA: Wolframs Media; 2002.
18. Bnasin H, Gupta N. On the applications of cellular automata and artificial life. *Int J Comput Sci Information Tech*. 2013;4:804-87.
19. Gronewold A, Sonneschen M. Event-based modeling of ecological systems with asynchronous cellular automata. *Ecol Model*. 1995;108:37-52.
20. Hogeweg P. Cellular automata as a paradigm for ecological modeling. *Applied Math Comput*. 1988;27:81-90.
21. Seanlon T, Caylor K, Levin S, Rodrigues-Iturbe I. Positive feedback promote power-low clustering of Kalachary vegetation. *Nature*. 2007;449:209-12.
22. Singh AK. *Modeling Land Use and Land Cover Changes Using Cellular Automata in a Geo-Spatial Environment*. ITC; 2003.
23. Vincent T.L. Modeling and management the evolutionary component in biological systems. *Ecol Modeling*. 1994;92:145-76.