

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.46.02

И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова, С.М. Солодова

Адаптивный баланс глобальных процессов развития

Процессы глобального саморегулирования биоты Земли (*GAIA*-теория [1]) рассмотрены с применением предложенного авторами метода адаптивного баланса влияний [5]. На примере модели *Daisy World* [10], построенной этим методом, показан эффект сохранения средней температуры поверхности планеты за счет растительного покрова. Построена интегрированная модель глобальных природных и социально-экономических процессов, в которой Мировой океан является одним из факторов регулирования парниковых газов в атмосфере. Снижение количества парниковых газов в атмосфере за счет *GAIA*-эффектов повышает количество ураганов и наводнений на планете. Как следствие растут уровни экологической и социальной опасности для населения Земли. Для устранения этих угроз необходимы процессы самоорганизации общества, обеспечиваемые ростом образования, науки и глобальным регулированием борьбы за природные ресурсы. Приводятся результаты вычислительных экспериментов с моделью, демонстрирующие возможные сценарии глобального развития с учетом процессов самоорганизации общества.

Введение

Устойчивое развитие человеческого общества включает в себя широкий круг проблем гармонизации взаимодействия человека с окружающей его природной средой. В фокусе внимания ученых и политиков находится проблема глобального потепления Земли, связанная с растущим количеством парниковых газов, поступающих в атмосферу как следствие развития энергетики и транспорта. Интенсивно изучаются возможные последствия этого явления для климата, мировой экономики, экологического состояния природной среды. В этой связи особый интерес представляет *GAIA*-теория [1], которая выдвигает гипотезы адаптации глобальных динамических процессов в живой и неживой природе. Начало этой теории было положено работами В.И. Вернадского [2], который, введя понятие «ноосфера», утверждал, что ноосфера является сложной системой, включающей в себя земную и океанскую флору и фауну, геологическое строение верхнего слоя суши и дна морей и океанов, а также химический состав атмосферы. Эта единая система находится в состоянии динамического баланса с внешними силами и в первую очередь – с солнечным излучением.

По мнению ученых, поддерживающих *GAIA*-теорию, глобальная система атмосфера – океан – поверхность суши вместе с населяющими их живыми организмами обладает способностью адаптироваться к изменениям внешних

© И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова, С.М. Солодова, 2007

условий путем саморегуляции, обеспечиваемой живыми организмами. Существует большое количество моделей, интегрально оценивающих глобальные процессы саморегуляции [3]. Некоторые из них выполнены с применением широко известного метода системной динамики [4]. В настоящей работе мы используем новый подход к рассмотрению этих вопросов, основанный на методе адаптивного баланса влияний (методе *ABC*) [5,6].

Целью работы является применение метода *ABC* к глобальной природной социальной эколого-экономической системе. Мы расширяем, таким образом, круг явлений саморегуляции, включая в их число и природные, и социально-экономические процессы. Такой подход можно рассматривать как некоторое развитие *GAI*A-теории. Мы вводим довольно естественное предположение о том, что человеческое общество, как высшая и наделенная интеллектом форма живой материи на Земле, обладает даже большими свойствами самоорганизации, чем все остальные формы жизни. Глобальная социальная эколого-экономическая система и ее природная окружающая среда находятся в состоянии адаптивного баланса, обеспечивающем устойчивое развитие. Основываясь на этой гипотезе, мы предлагаем одну из моделей адаптивного баланса влияний глобальных природных и общественно-экономических процессов и проводим имитационные эксперименты с этой моделью.

***GAI*A-теория и эффекты саморегуляции**

Британский ученый Джеймс Лавлок определил *GAI*A как «комплексную сущность, включающую в себя земную биосферу, атмосферу, океаны и сушу, нечто целое, образующее систему с обратной связью, которая устремляет ее к оптимальным для жизни физическим и химическим условиям окружающей среды» [7]. Он предположил, что существует глобальная саморегуляция природных процессов, в результате которой средняя поверхностная температура Земли колеблется в узком диапазоне значений 10 – 22 °С, несмотря на рост поступающей от Солнца энергии. Уже около 4 миллиардов лет средняя температура Земли остается в этих пределах, в то время как солнечная радиация за этот период увеличилась на одну треть. Для объяснения крупномасштабной саморегуляции температуры выдвинуты два основных предположения.

Прежде всего, под действием микроорганизмов, лишайников, корней растений происходит разрушение и измельчение горных пород, что приводит к их выветриванию. Этот процесс усиливается с повышением средней температуры, и он продуцирует дополнительные нутриенты, которые многие из живых организмов могут использовать для своего роста и распространения по поверхности суши. Увеличение зеленой массы растений, в свою очередь, уменьшает содержание CO_2 в атмосфере и понижает среднюю температуру поверхности Земли.

Второй механизм саморегуляции температуры связан с Мировым океаном. С ростом температуры объем морских водорослей также возрастает. Они поглощают атмосферный CO_2 , тем самым понижая среднюю температуру. Заметим, что океан оказывает влияние и на локальную температуру приводного слоя атмосферы. В процессе отмирания морских водорослей образуется

газ (диметилсульфид), который выделяется в атмосферу и образует в ней сульфатные аэрозоли. Последние служат ядрами конденсации для образования облачности, уменьшающей солнечную радиацию и понижающей температуру поверхности океана и приземного слоя атмосферы [8].

Влияние населяющих Землю живых организмов проявляется и в том, что постоянным остается химический состав атмосферы, хотя она находится в неравновесном состоянии. Атмосфера Земли содержит очень мало двуокси углерода по сравнению с соседними планетами Венерой и Марсом, где в условиях химического равновесия ее объем превышает 95 %. Земная атмосфера содержит 79 % азота, 20,7 % кислорода и 0,03 % углекислого газа. Такая смесь может оставаться стабильной только благодаря живым организмам, которые компенсируют недостачу или изымают излишки концентраций этих газов в атмосфере. Наибольший вклад в концентрацию CO_2 в атмосфере дают извержения вулканов.

Сложные бактериальные процессы поддерживают постоянным отношение концентраций азота и фосфора в морской воде, в фито- и зоопланктоне. Несмотря на вынос в море в огромных количествах минеральных веществ с поверхности суши, постоянным сохраняется и солевой состав Мирового океана. Это имеет важное значение для клеток живых организмов, так как они начинают гибнуть при увеличении солености. Соленость регулируется процессами испарения и распреснения океана, которые в значительной степени зависят от локальных температурных градиентов и от осадков, связанных с образованием облачности.

Не вызывает сомнения тот факт, что биосфера Земли ведет себя как саморегулирующаяся система. Это эмерджентное свойство биосферы является результатом бесчисленных актов живых организмов, стремящихся выжить при постоянно меняющихся внешних условиях их существования. Стронники *GAI*-теории утверждают, что Земля представляет собой единый организм, управляемый таким образом, чтобы обеспечить условия для жизни во всех ее проявлениях.

Эффекты саморегуляции подтверждают дарвиновскую теорию эволюции. В процессе естественного отбора те из живых организмов, которые были способны к саморегулированию, получали селективное преимущество перед остальными. Они выжили и сохранили способность к саморегуляции, передавая ее по наследству. Аналогичные процессы произошли и на экосистемном уровне. Те из экосистем, которые имели в своем составе отрицательные обратные связи, обеспечивающие саморегуляцию, приобрели способность адаптироваться к внешним воздействиям. Таким образом, процессы саморегуляции приняли глобальный характер [8].

Лин Маргулис высказала предположение о том, что атмосфера, гидросфера и литосфера саморегулируются таким образом, что их состояния стремятся к некоторым меняющимся во времени сценариям развития [9]. Такая же идея динамического баланса процессов в сложных системах используется и в методе адаптивного баланса влияний, предложенном для моделирования

сложных систем [5]. Ниже мы рассматриваем использование этого метода для моделирования глобальных процессов самоорганизации.

Моделирование эффектов саморегуляции в модели *Daisy World*

Одна из первых моделей, имитирующих глобальные процессы саморегуляции температуры, была построена в ответ на критику *GAIА*-теории. Модель получила название *Daisy World* [10]. Она представляла собой некоторую планету солнечной системы, населенную только двумя видами живых организмов: белыми и черными маргаритками (*daisies*). Оба вида имели одинаковые условия роста и распространения по планете, так как у них была одинаковая зависимость скорости репродукции GF от температуры T :

$$GF = 1 - 0,003265(22,5 - T)^2. \quad (1)$$

Белые маргаритки отражали солнечное излучение в большей степени, чем черные. Поэтому черные маргаритки были теплее белых. Их преобладание на планете означало бы повышение температуры всей планеты. Модель была построена для того, чтобы изучать процессы адаптации растительности планеты к постепенно увеличивающемуся внешнему воздействию – росту солнечной радиации.

В начале эксперимента температура планеты была настолько низкой, что только малая часть маргариток могла выжить. Как следует из соотношения (1), наилучшим условием для этого является температура 22,5°C. По мере роста температуры планеты наступали условия гомеостаза как для белых, так и для черных маргариток. Фактор роста (1) определял тот диапазон температур, при котором белые и черные маргаритки были способны расселяться по планете. Каждый вид маргариток действовал по своим правилам, однако объединенная система приобрела новое качество – стабильность температуры, поддерживаемую механизмом адаптации.

Представляет интерес построение модели *Daisy World* методом адаптивного баланса влияний [5]. Вкратце суть этого метода состоит в следующем.

Пусть имеются n переменных x_1, x_2, \dots, x_n , которые характеризуют сценарии интересующих нас процессов в окружающей среде. Обозначим через $a_{ij}x_j$ то влияние, которое оказывает процесс x_j на процесс x_i . Примем, что положительным влияние будет тогда, когда тенденции изменения x_j и x_i совпадают по знакам. Примем также, что по крайней мере на небольших интервалах времени каждый из процессов может быть выражен линейной комбинацией остальных процессов. Тогда для процесса x_i справедливо представление

$$x_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + \dots + a_{in}x_n \quad \text{при } a_{ii} = 0, \quad (2)$$

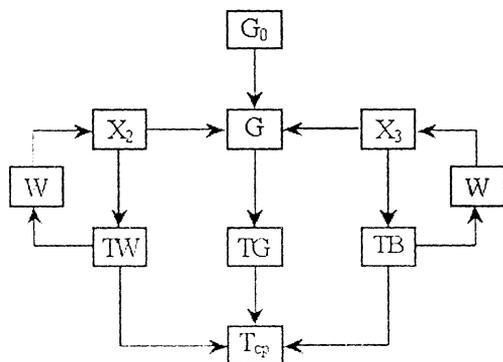
в котором коэффициенты a_{ps} сохраняют постоянные значения в пределах выбранного интервала времени.

Основное уравнение метода *ABC* выражает собой баланс тенденций в изменении значений процесса, обусловленных влияниями на него со стороны других процессов. Оно имеет следующий вид:

$$dx_i / dt = x_i - 2(a_{i1}x_1x_i + a_{i2}x_2x_i + a_{i3}x_3x_i + \dots + a_{in}x_nx_i + x_i^2). \quad (3)$$

При этом взаимные влияния процессов внутри системы относятся к так называемым «парным взаимодействиям» $x_p x_s$, которые обычно используют в экономике, биологии и других науках для описания резко выраженных эффектов влияния одних процессов на другие [6].

Рассмотрим процессы саморегуляции глобальной температуры в модели *ABC Daisy World*, которая показана на рис. 1. Средняя температура планеты T_{cp} зависит от тех количеств тепла, которые поглощаются каждой из трех частей поверхности планеты: части X_2 , занятой белыми маргаритками и имеющей температуру TW , части X_3 , занятой черными маргаритками с температурой TB , и остающейся не занятой ничем поверхности G с температурой TG . Примем, что часть X_2 имеет альбедо 0,75, часть X_3 – 0,25, а часть G – 0,5. Общую площадь поверхности планеты обозначим G_0 , а интенсивность солнечного излучения – $SR(t)$, где t – время.



Р и с. 1. Концептуальная модель *ABC Daisy World*

В отличие от эксперимента работы [10] будем использовать для фактора роста не параболическую (1), а гауссовскую кривую W . Такое приближение представляется более естественным для описания пределов изменения температуры планеты, при которых возможно существование маргариток:

$$W = \exp[-0,1(22,5 - T)^2], \quad (4)$$

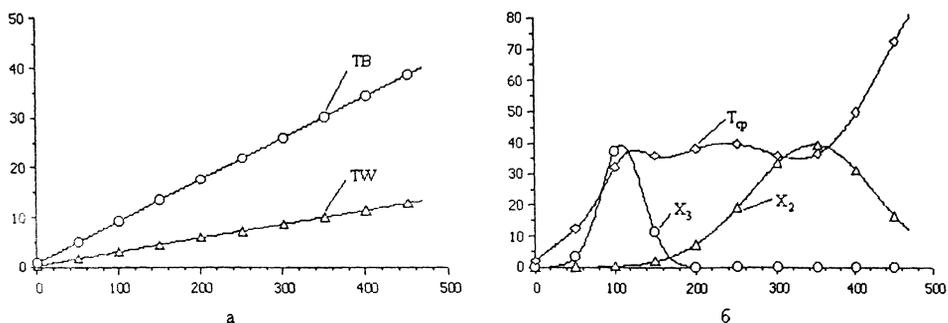
где T равно TW или TB . При этих условиях уравнения (3) дают следующую динамическую модель *ABC Daisy World*:

$$\begin{aligned}
 dx_2 / dt &= x_2 \{1 - 2[x_2 - a_{23}(G_0 - x_3)(\exp[-0,1(22,5 - TW)^2])]\}, \\
 dx_3 / dt &= x_3 \{1 - 2[x_3 - a_{32}(G_0 - x_2)(\exp[-0,1(22,5 - TW)^2])]\}, \\
 G &= G_0 - x_2 - x_3, \quad TW = 0,25(SR)G_0^{-1}, \quad TB = 0,75(SR)G_0^{-1}, \\
 T_{cp} &= SR(0,5G_0 + 0,25x_3 + 0,25x_2)G_0^{-1}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Проведенные с этой моделью вычислительные эксперименты должны были показать реакцию модели на рост солнечной радиации, падающей

на планету. С этой целью был имитирован линейный рост солнечного излучения SR , сопровождавшийся увеличением температуры поверхностей x_2 и x_3 .

В целях упрощения средняя температура планеты считалась пропорциональной количеству тепла, поглощенного площадью ее поверхности G_0 . Линии роста температуры площадей планеты, занятых черными и белыми маргаритками, изображены на рис. 2, а. Были построены сценарии расселения по планете черных и белых маргариток. Уравнения (5) позволили рассчитать динамику площадей, занимаемых каждым из видов, в условиях роста солнечной радиации. Сценарии расселения видов, полученные с учетом лимитирующего фактора роста (4), приведены на рис. 2, б. Для большей наглядности кривые x_2 и x_3 помещены на один рисунок вместе с соответствующим этим сценариям временным ходом средней температуры планеты T_{cp} .



Р и с. 2. Результаты вычислительного эксперимента с моделью *ABC Daisy World*

Как следует из этого рисунка, существование двух форм жизни на планете в период времени эксперимента с 200-го по 400-й шаг вычислений привело к стабилизации средней температуры планеты. При значительном росте солнечной радиации средняя температура планеты практически не менялась. Несмотря на простоту построенной модели, проведенные с ней эксперименты позволяют сделать вывод о возможности использования метода *ABC* для изучения глобальных процессов адаптации живой и неживой природы, относящихся к *GAIA*-теории.

Построение динамической модели глобальной социальной эколого-экономической системы

Применим теперь метод моделирования *ABC* для построения модели глобальной социальной эколого-экономической системы [11]. Развитие процессов в подобной системе происходит на фоне тех природных адаптационных процессов, которые изучает *GAIA*-теория. В соответствии с ней доминирующее стремление биоты сохранить благоприятные для жизни условия на Земле приводит к колебаниям глобальных климатических процессов. В частности, саморегуляция средней температуры поверхности Земли вызывает

резкие изменения атмосферных процессов, порождая ураганы и наводнения. Связанные с ними стихийные бедствия неизбежно сказываются на социальных, экологических и экономических процессах глобального развития. Таким образом, естественно объединить природные и социально-экономические процессы адаптации в единую глобальную систему.

В соответствии с системными принципами построения *ABC*-моделей [6] определим наиболее важные для этой цели процессы мирового развития. Основными целевыми установками устойчивого развития являются материальный уровень жизни населения Земли и обеспечение безопасности людей. Достижение этих целей зависит от большого количества факторов. Стремясь выбрать из них самые значимые, условимся считать, что материальный уровень жизни населения в первую очередь зависит от развития производства, количества населения и его занятости. Развитие производства определяется образованием, наукой, технологиями производства и использованием ресурсного потенциала Земли. К нему отнесем природные, экономические, информационные и другие возможности повышения уровня жизни людей путем развития производства.

Рост производства уменьшает безработицу, но одновременно ухудшает качество окружающей среды за счет загрязнения ее отходами промышленности, энергетики, транспорта, сельского хозяйства. В связи с проблемой глобального потепления климата особое внимание уделяется выбросам в атмосферу CO_2 и других парниковых газов, которые будем считать пропорциональными уровню развития производства. Содержание парниковых газов в атмосфере повышает среднюю температуру поверхности. Однако упомянутые выше механизмы саморегуляции вступают в силу и компенсируют это повышение. Чтобы учесть эффекты саморегуляции температуры, введем в модель механизм обратной связи, обеспечивающий подобную компенсацию.

Мировой океан считается одним из основных факторов природного саморегулирования концентрации парниковых газов. Учтем в модели влияние Мирового океана, вводя отрицательную обратную связь между колебаниями концентрации CO_2 в атмосфере и разностью средних температур. В качестве последней будем рассматривать отклонение текущей средней температуры поверхности Земли от среднего многолетнего значения.

Важным побочным эффектом саморегулирования температуры являются резкие колебания погоды, проявляющиеся в возникновении ураганов и наводнений. Их влияния на глобальное развитие будут представлены в модели процессами «ураганы» и «наводнения», отражающими интегрально как количество, так и силу этих явлений.

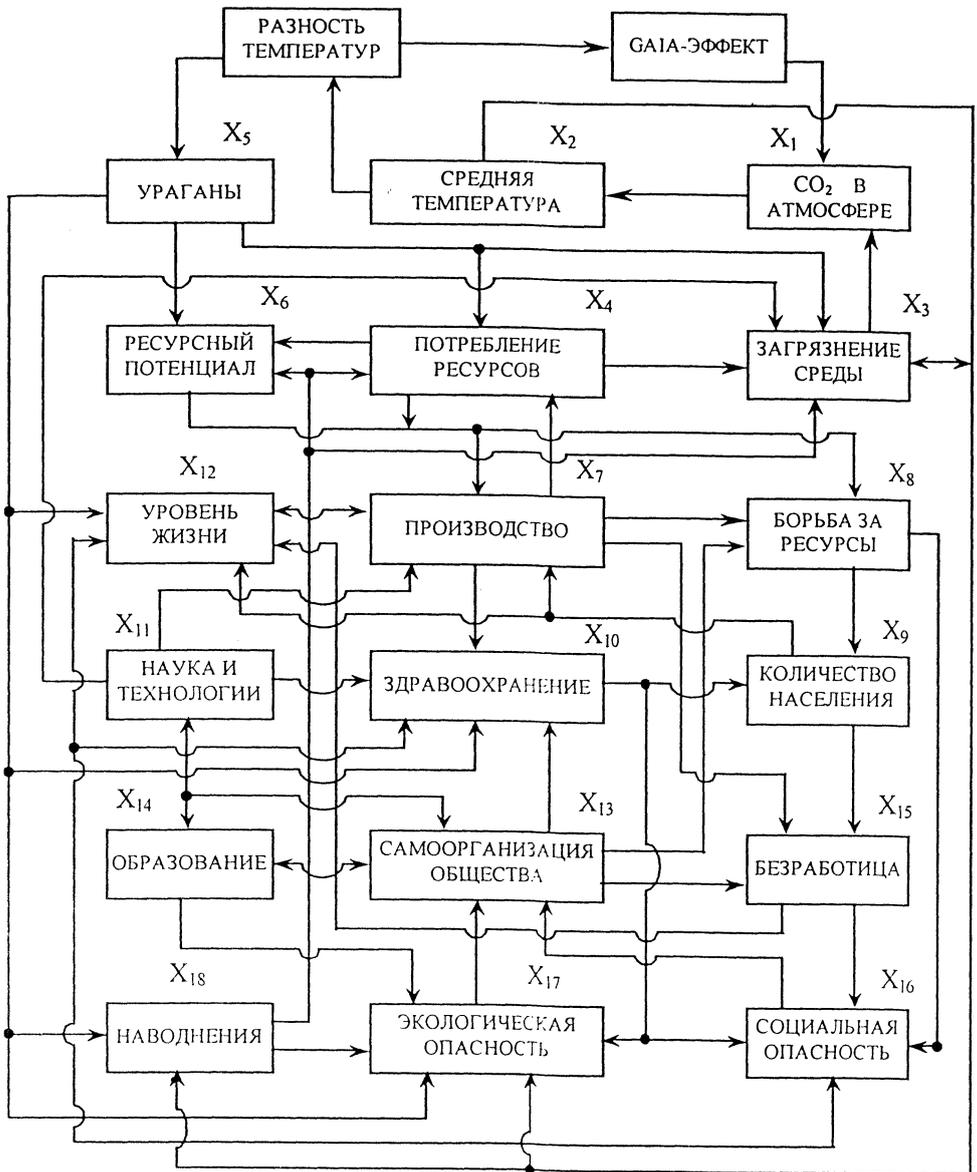
Наиболее значимыми для безопасности людей являются экологические процессы в природной среде и социально-политические – в обществе. В целях упрощения примем, что человечеству угрожают два интегрированных процесса: «экологическая опасность» и «социальная опасность». Среди факторов, увеличивающих экологическую опасность, отметим стихийные бедствия и загрязнение окружающей среды. Им противостоит развитие образования и здравоохранения, которые уменьшают уровни болезней и смертности людей и, как следствие, понижают уровень экологической опасности.

В качестве основных факторов, формирующих социальную опасность, будем учитывать борьбу за ресурсы, материальный уровень жизни, безработицу и состояние здравоохранения. Вполне очевидно, что это – весьма ограниченный перечень причин, способных вызвать социальные потрясения. Борьба за ресурсы подразумевает войны, социально-политические перевороты, нарушения демократических прав и свобод граждан, терроризм, распространение наркотиков. Среди причин, влияющих на социальную опасность, отметим также низкий материальный уровень жизни людей, высокий уровень безработицы, плохое состояние здравоохранения [12].

Подобно тому как *GAMA*-теория выдвигает гипотезу о саморегуляции средней температуры поверхности для сохранения жизненных форм на Земле, мы предположим, что существуют механизмы самоорганизации общества, способные компенсировать рост экологической и социальной опасности. Движущими силами этих механизмов являются наука и образование. Благодаря глобальным процессам информатизации мировое сообщество получило новые возможности управления устойчивым развитием путем распространения по всему миру знаний и передовых технологий производства, достижений здравоохранения и охраны окружающей среды. Важную роль играют такие общепризнанные модели социально-политической организации людей, как «открытое (гражданское) общество» [13]. Включая в модель процесс «самоорганизация общества», мы обеспечиваем противодействие растущей экологической и социальной опасности за счет компенсирующего влияния со стороны достижений образования, науки и системного мышления [6].

Перечисленные соображения были использованы для построения концептуальной модели глобальных процессов развития, показанной на рис. 3. Для проведения вычислительных экспериментов эта модель должны быть формализована. Воспользуемся для этого стандартным модульным уравнением (3) метода *ABC*, которое было применено выше при построении модели *Daisy World*. Обозначим процессы, включенные в концептуальную модель рис. 3, следующим образом: x_1 – концентрация CO_2 в атмосфере, x_2 – средняя температура поверхности, x_3 – степень загрязнения окружающей среды, x_4 – интенсивность потребления ресурсов, x_5 – частота и интенсивность ураганов, x_6 – ресурсный потенциал, x_7 – уровень производства, x_8 – уровень политического противостояния в мире, обусловленного борьбой за ресурсы, x_9 – количество населения Земли, x_{10} – состояние здравоохранения, x_{11} – уровень развития науки и технологий, x_{12} – материальный уровень жизни, x_{13} – степень самоорганизации мирового сообщества, x_{14} – уровень развития образования (образованности общества), x_{15} – уровень безработицы, x_{16} – уровень социальной опасности, x_{17} – уровень экологической опасности, x_{18} – частота и интенсивность наводнений. Введенные обозначения позволяют выписать следующие уравнения динамической *ABC*-модели глобальной социальной эколого-экономической системы:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= x_1[1 - c_1(x_1 - a_{13}x_3 - A\{(1 - \exp[-\alpha t])\})], \\
\frac{dx_2}{dt} &= x_2[1 - c_2(x_2 - a_{21}x_1)], \\
\frac{dx_3}{dt} &= x_3[1 - c_3(x_3 - a_{35}x_5 + a_{3/11}x_{11} + a_{3/18}x_{18} - a_{34}x_4)], \\
\frac{dx_4}{dt} &= x_4[1 - c_4(x_4 - a_{45}x_5 - a_{4/18}x_{18} - a_{47}x_7)], \\
\frac{dx_5}{dt} &= x_5[1 - c_5(x_5 - a_5(x_2 - T_N))], \\
\frac{dx_6}{dt} &= x_6[1 - c_6(x_6 + a_{64}x_4 + a_{65}x_5 + a_{6/18}x_{18} - a_{6/11}x_{11})], \\
\frac{dx_7}{dt} &= x_7[1 - c_7(x_7 - a_{76}x_6 - a_{7/12}x_{12} - a_{7/11}x_{11} - a_{19}x_9)], \\
\frac{dx_8}{dt} &= x_8[1 - c_8(x_8 + a_{86}x_6 - a_{87}x_7 + a_{8/13}x_{13} - a_{84}x_4)], \\
\frac{dx_9}{dt} &= x_9[1 - c_9(x_9 - a_{9/10}x_{10} + a_{98}x_8)], \\
\frac{dx_{10}}{dt} &= x_{10}[1 - c_{10}(x_{10} - a_{10/7}x_7 - a_{10/11}x_{11} - a_{10/14}x_{14} - a_{10/17}x_{17})], \\
\frac{dx_{11}}{dt} &= x_{11}[1 - c_{11}(x_{11} - a_{11/7}x_7 - a_{11/14}x_{14})], \\
\frac{dx_{12}}{dt} &= x_{12}[1 - c_{12}(x_{12} - a_{12/9}x_9 + a_{12/15}x_{15} - a_{12/7}x_7 + a_{12/16}x_{16} + a_{12/5}x_5)], \\
\frac{dx_{13}}{dt} &= x_{13}[1 - c_{13}(x_{13} - a_{13/14}x_{14} - a_{13/11}x_{11} + a_{13/16}x_{16} - a_{13/17}x_{17})], \\
\frac{dx_{14}}{dt} &= x_{14}[1 - c_{14}(x_{14} - a_{14/13}x_{13} - a_{14/11}x_{11} - a_{14/12}x_{12})], \\
\frac{dx_{15}}{dt} &= x_{15}[1 - c_{15}(x_{15} + a_{15/9}x_9 + a_{15/7}x_7 + a_{15/13}x_{13})], \\
\frac{dx_{16}}{dt} &= x_{16}[1 - c_{16}(x_{16} - a_{16/15}x_{15} + a_{16/10}x_{10} - a_{16/17}x_{17} - a_{16/8}x_8)], \\
\frac{dx_{17}}{dt} &= x_{17}[1 - c_{17}(x_{17} + a_{17/14}x_{14} - a_{17/18}x_{18} - a_{17/5}x_5 - a_{17/8}x_8)], \\
\frac{dx_{18}}{dt} &= x_{18}[1 - c_{18}(x_{18} - a_{18/2}x_2 - a_{18/5}x_5)].
\end{aligned} \tag{6}$$



Р и с. 3. Интегрированная модель глобальных природных и социально-экономических процессов

Адаптация сценариев развития в глобальной социальной эколого-экономической системе

Удобно использовать безразмерные процессы $x_1 - x_{18}$, приведенные к какой-либо общей шкале изменчивости, например (0,10). Для этого достаточно выполнить нормировку и линейные преобразования исходных размерных процессов, а также задать масштабные коэффициенты $c_i = 0,1$ ($i = 1, 2, \dots, 18$) [6].

Выбор коэффициентов влияний a_{ij} в уравнениях (6) обеспечит взаимное приспособление всех процессов и приведет систему в стационарное состояние баланса влияний. Если включить после этого внешние влияния, система перейдет в режим адаптивной подстройки под эти влияния. Обеспечение необходимых сценариев развития будет имитировать эффекты саморегулирования. Глобальные процессы развития будут адаптированы к подобным сценариям за счет взаимодействия положительных и отрицательных обратных связей в модели (6).

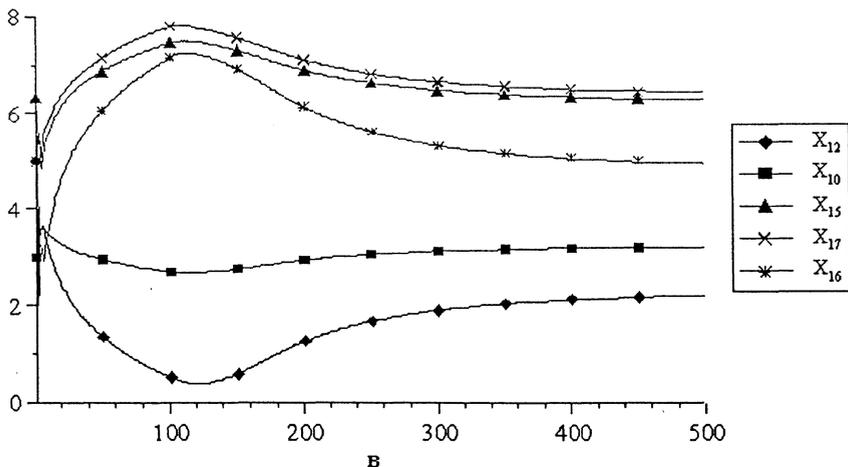
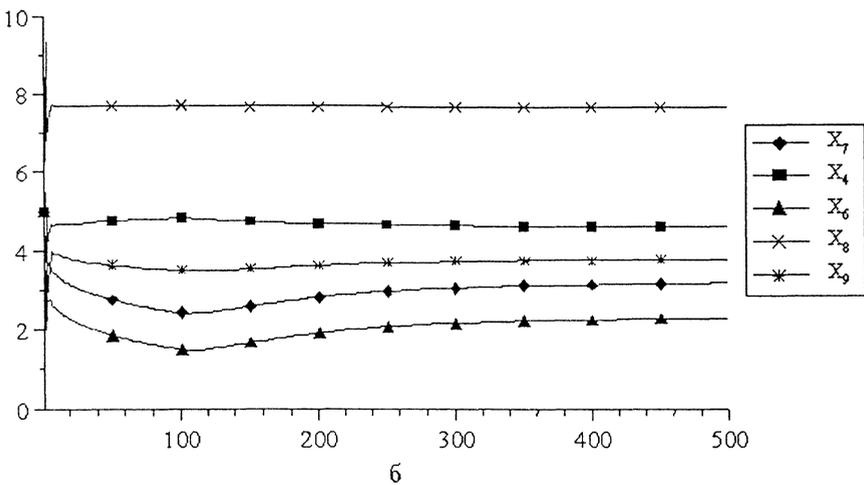
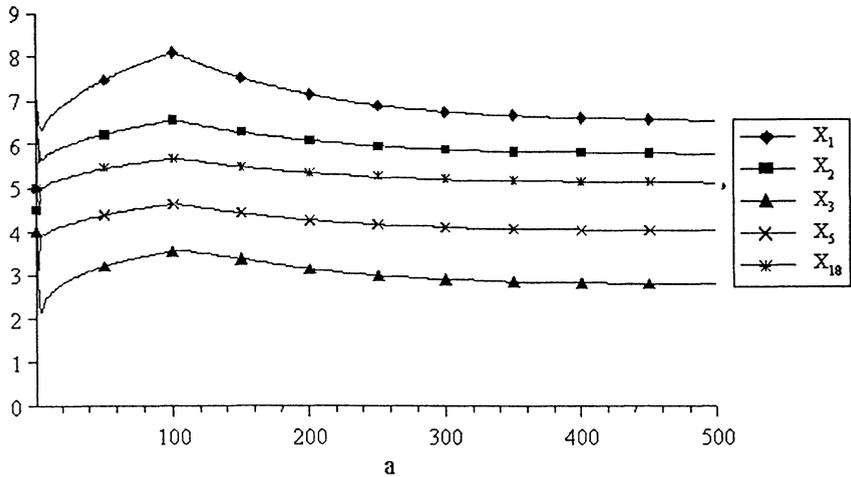
Расчеты по этой модели выполнялись на 500 шагов безразмерного времени. Коэффициенты модели подбирались таким образом, чтобы обеспечить требуемые влияния одних процессов на другие.

В первом вычислительном эксперименте был задан рост солнечной радиации, сопровождавшийся увеличением концентрации CO_2 в атмосфере на первых 100 шагах времени. С этой целью в правую часть первого уравнения системы (6) была добавлена экспоненциальная функция, растущая с насыщением ($\alpha = 0,1$). Таким способом была имитирована ситуация, при которой саморегуляция средней температуры за счет *GAlA*-эффектов в этот период времени отсутствовала. Начиная со 101-го шага, *GAlA*-регулировка $A\{\dots\}$ была включена и влияние экспоненциального слагаемого в уравнении для концентрации CO_2 в атмосфере было постепенно компенсировано. Полученные глобальные сценарии развития приведены на рис. 4, *a – в*.

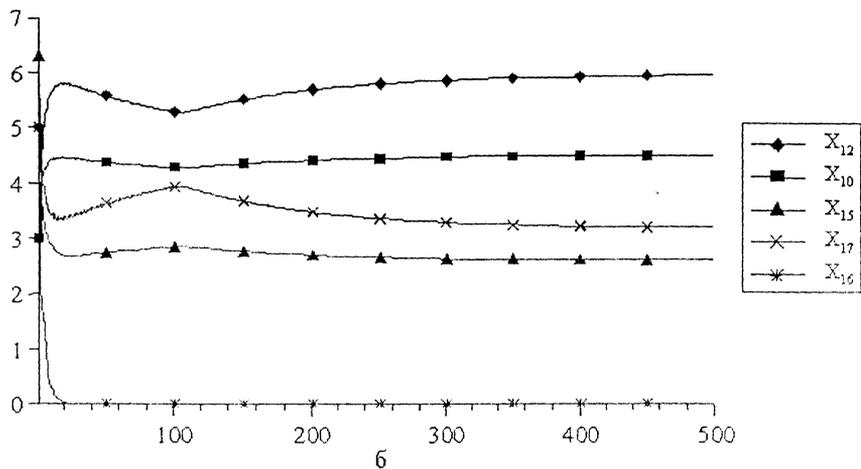
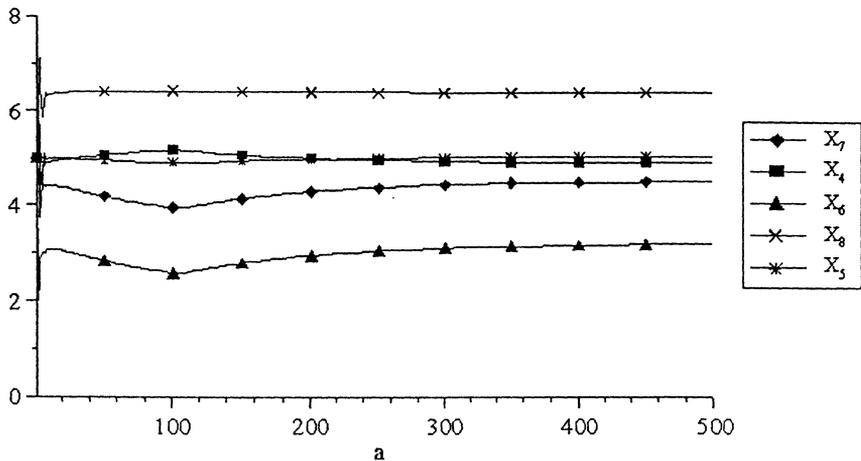
Как следует из рисунка, в начальный период времени, с 1-го по 100-й шаг, вместе с ростом средней температуры увеличилась интенсивность ураганов и наводнений и выросло загрязнение окружающей среды. Сократился ресурсный потенциал, и уменьшилось производство. Резко возросла безработица и существенно увеличилась экологическая и социальная опасность. После включения на 101-м шаге механизмов саморегуляции средней температуры эти негативные тенденции развития были компенсированы вместе с нормализацией средней температуры.

В описанном эксперименте не были использованы общественно-политические механизмы саморегуляции процессов развития: не был включен процесс x_{13} – «самоорганизация общества». Выше мы предположили, что развитие и распространение знаний неизбежно приведет к появлению ответной реакции человечества на усиливающуюся экологическую и социальную опасность. Самоорганизация общества должна снизить угрозы для жизни людей и поднять уровень их благосостояния.

Для проверки подобных «расширенных *GAlA*-эффектов в обществе» был повторен описанный выше расчет с включенным в действие процессом самоорганизации x_{13} . Результаты приведены на рис. 5, *a, б*. Сравнивая между собой сценарии процессов, приведенные на рис. 4, *в* и 5, *б*, можно заметить резкое уменьшение экологической и практически полное исчезновение социальной опасности. *GAlA*-эффект был включен на 100-м шаге вычислений и имел скорость компенсации избытка CO_2 .

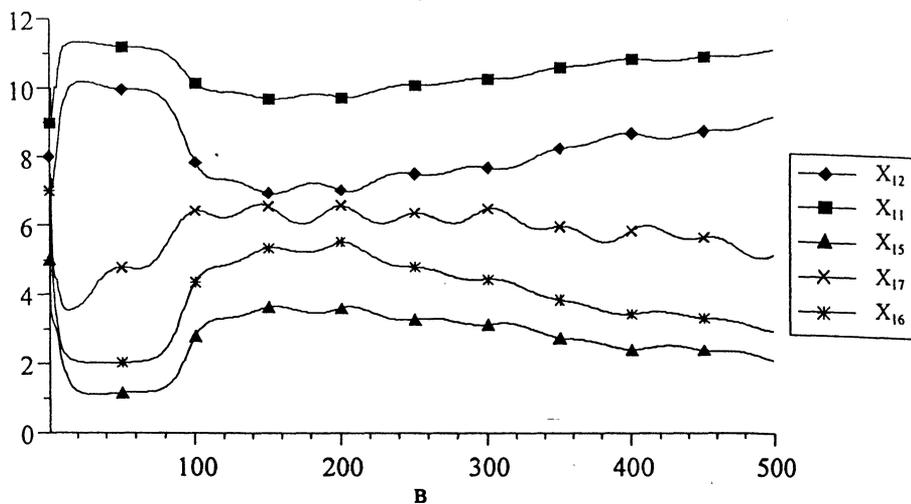
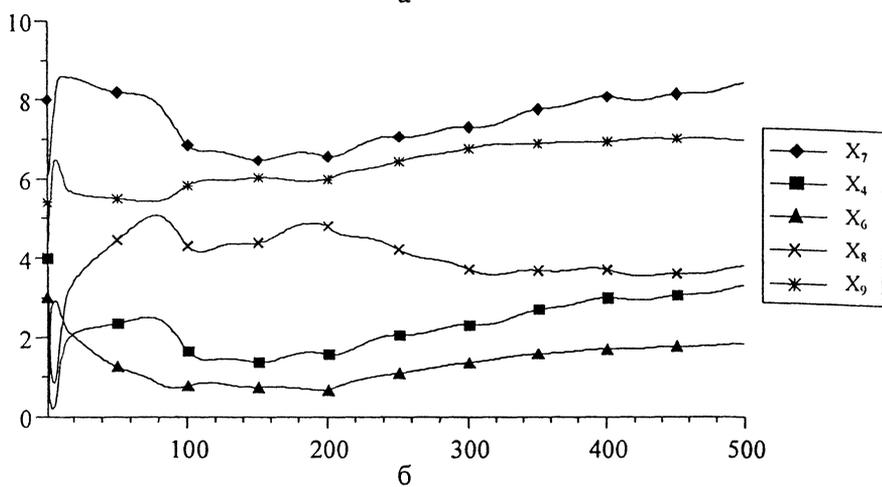
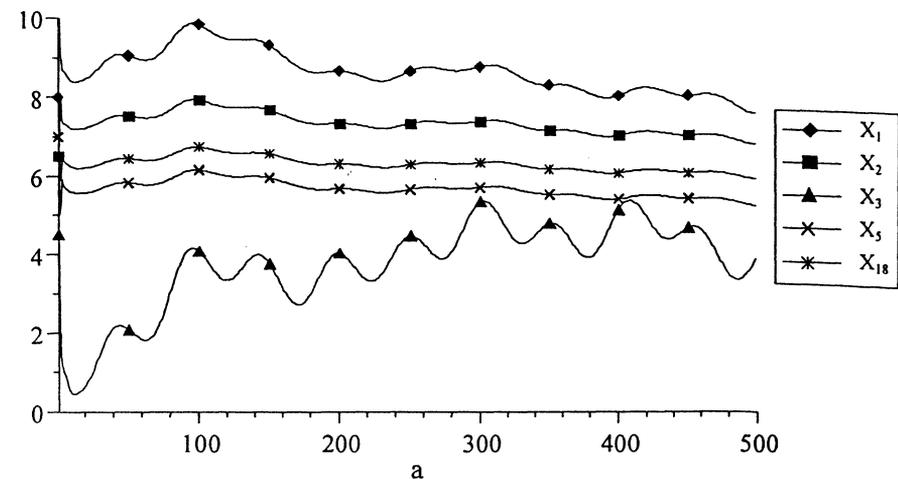


Р и с. 4. Процессы, сопровождающие увеличение концентрации CO_2 в атмосфере (GAIA-эффект включен на 100-м шаге вычислений для компенсации избытка CO_2)

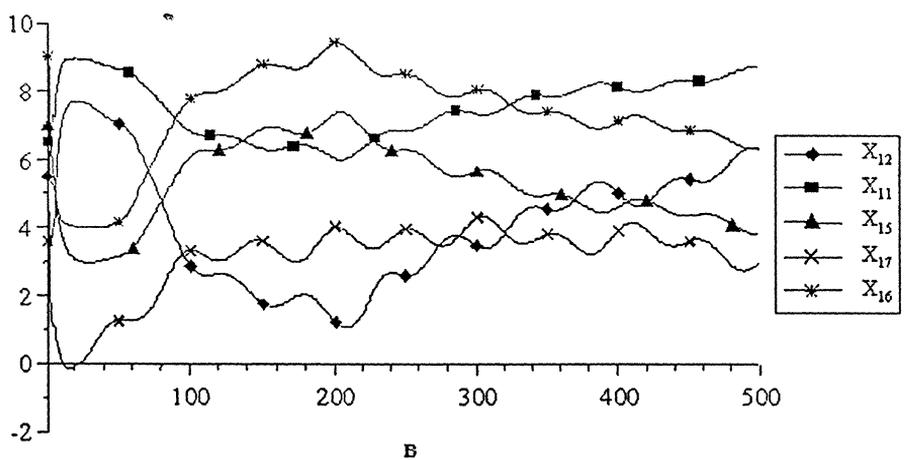
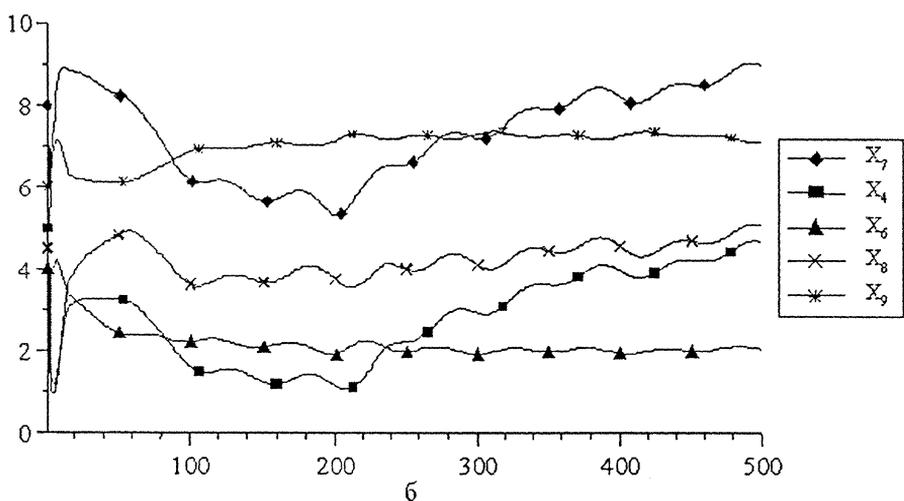
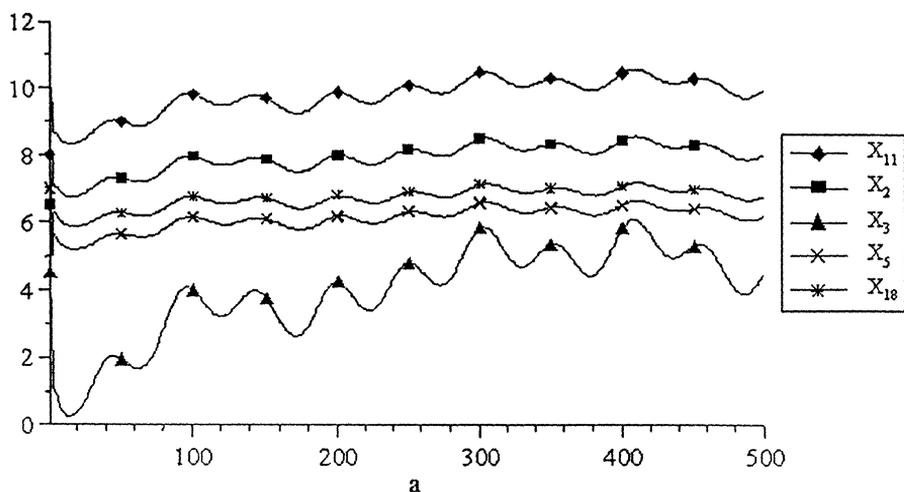


Р и с. 5. Роль самоорганизации общества: с 200-го шага вычислений имитировано прекращение борьбы за ресурсы

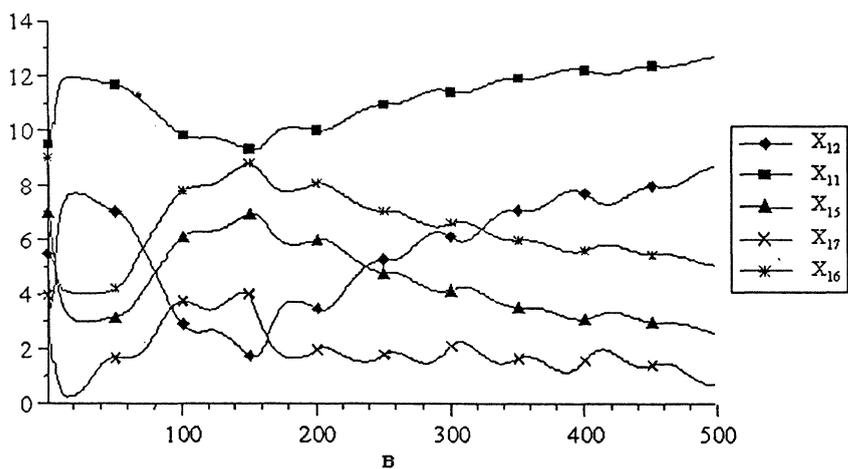
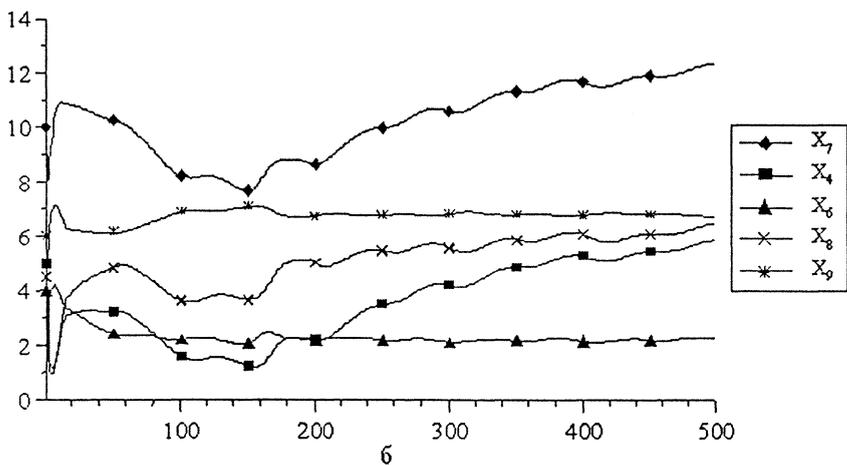
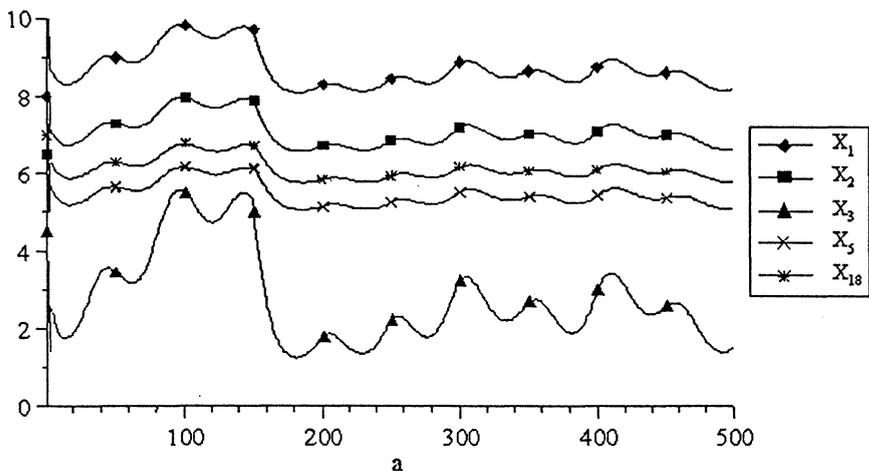
В следующем вычислительном эксперименте были имитированы случайные колебания концентрации парниковых газов в атмосфере, вызываемые мощными выбросами CO_2 , происходящими при извержениях вулканов и крупных лесных пожарах. В этом эксперименте сначала имитирован рост конкурентной борьбы за ресурсы, а затем, после 200-го шага вычислений, – ее прекращение. Соответствующие сценарии развития показаны на рис. 6, а – в. На первых 100 шагах вычислений в условиях отсутствия *GAIA*-регулировки средней температуры резко возросли уровни экологической и социальной опасности, усилилась борьба за ресурсы, наблюдалось резкое падение ресурсного потенциала и уровня жизни. После включения эффекта регулировки средней температуры появилась тенденция к ее уменьшению. Однако рост уровня загрязнения окружающей среды сохранился. Продолжалось, хотя и замедленное, падение ресурсного потенциала и уровня жизни. Экологическая и социальная опасность оставалась высокой.



Р и с. 6. Сценарии развития при флуктуирующем росте выбросов CO_2 в атмосферу, когда *GAIA*-эффект способен компенсировать этот рост



Р и с. 7. Сценарии развития при неспособности *GAIA*-эффекта компенсировать флуктуирующий рост выбросов CO_2 в атмосферу



Р и с. 8. Роль применения, начиная со 160-го шага вычислений, новых экологически чистых технологий

С 200-го шага по времени было имитировано постепенное ослабление борьбы за ресурсы как следствие процессов самоорганизации общества. Это отчетливо демонстрирует график кривой x_8 на рис. 6, б. С ним явно связано поведение после 200-го шага вычислений всех сценариев развития. Несмотря на то что уровень загрязнения окружающей среды x_3 оставался высоким, наметилась тенденция к уменьшению экологической опасности x_{17} . Начала заметно снижаться социальная опасность x_{16} , появился рост производства x_7 и жизненного уровня x_{12} . Таким образом, природные механизмы *GAI*A-регуливки, усиленные механизмами самоорганизации общества, способны контролировать глобальные сценарии развития даже в условиях значительного уровня загрязнения окружающей среды.

Представляло интерес провести эксперимент, в котором природные механизмы *GAI*A-регуливки оказываются неспособными полностью исключить рост средней температуры поверхности Земли. Могут ли в этих условиях эффекты самоорганизации общества ослабить экологическую и социальную опасность и поднять материальный уровень населения Земли? Эту ситуацию иллюстрируют сценарии развития, приведенные на рис. 7, а – в. Как следует из графиков на рис. 7, а, флуктуирующий тренд уровня загрязнений окружающей среды сопровождался незначительным ростом средней температуры и связанной с этим высокой интенсивностью ураганов и наводнений. Графики развития производства и жизненного уровня (рис. 7, б) падали. Кривые экологической x_{17} и социальной x_{16} опасности демонстрировали значительный рост (рис. 7, в).

Такие тенденции наблюдались до 200-го шага вычислений, когда был включен один из компенсационных механизмов самоорганизации общества: имитирован рост влияния науки и новых технологий x_{11} (рис. 7, в) на производство x_7 . Это привело к резкому подъему производства (рис. 7, б), уровня жизни x_{12} и некоторому ослаблению социальной опасности x_{16} (рис. 7, в). Тем не менее уровень экологической опасности x_{16} остался высоким. Сохранялся высоким и уровень конкурентной борьбы за ресурсы x_8 (рис. 7, б).

Для того чтобы снизить экологическую опасность, наука должна не только способствовать росту производства, но и создавать для него передовые экологически чистые технологии, уменьшающие загрязнение окружающей среды. Результаты вычислительного эксперимента, показывающего роль экологически чистых технологий производства, приведены на рис. 8, а – в. В этом эксперименте, проводившемся при тех же условиях, что и предыдущий, новые научные технологии были нацелены на уменьшение уровня загрязнения окружающей среды и, в частности, на сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу. Экологически чистые технологии были введены в действие, начиная со 150-го шага вычислений, что привело к резкому падению уровня загрязнения x_3 и концентрации CO_2 в атмосфере x_1 (рис. 8, а). Несмотря

на некоторый рост конкурентной борьбы за ресурсы x_8 , вызванный увеличением производства x_7 (рис. 8, б), уровень социальной опасности x_{16} значительно понизился, а уровень жизни x_{12} значительно вырос (рис. 8, в).

Заключение

Имитационное моделирование процессов в интегрированной системе океан – атмосфера – суша интенсивно развивается в связи с проблемами устойчивого мирового развития. Моделирование глобальных процессов развития позволяет оценивать возможную роль саморегулирования в адаптивном балансе этих процессов. Речь не идет о подтверждении гипотез *GAIA*-теории путем вычислительных экспериментов на моделях, поскольку для этого необходимо привлекать фактические наблюдения глобальных перемен в природной среде и в общественно-экономических системах. Однако имитационное моделирование способно подсказать, какие наблюдения должны быть выполнены и систематизированы с этой целью. В настоящей работе мы подтверждаем перспективность применения относительно нового метода адаптивного баланса влияний [5,6] для построения динамических моделей процессов глобального развития. Этот метод позволяет довольно легко объединить в рамках общей интегрированной модели природные и социально-экономические процессы глобального развития.

Нами сформулирована «расширенная *GAIA*-гипотеза», смысл которой состоит в предположении, что человеческое общество наделено значительно большими механизмами саморегуляции, чем все остальные формы жизни на Земле. В основе саморегуляции общества лежат процессы самоорганизации, непрерывно протекающие на протяжении столетий. Они состоят в поисках рациональных и справедливых социально-экономических систем, принципов общественной морали, стабильного мирового политико-правового устройства.

Рассмотренная выше относительно простая модель глобальной социальной эколого-экономической системы была построена с целью показать возможности прогнозирования сценариев развития. Этим мы хотели подчеркнуть важность подобных динамических моделей для управления устойчивым развитием. Принятие правильных решений, касающихся использования природных, экологических и экономических ресурсов Земли, должно опираться на прогнозируемые модельные сценарии глобальных процессов с учетом адаптивного баланса возможных причин и следствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lovelock J.E. Gaia: The Practical Science of Planetary Medicine. – London: Gaia Books Limited, 1991. – 240 p.
2. Вернадский В.И. Об условиях появления жизни на Земле // Изв. АН СССР. Сер. Геология и геохимия. – 1931. – № 2. – С. 633 – 653.

3. *Downing K., Zvirinsky P.* The simulated evolution of biochemical guilds: reconciling of Gaia theory and natural selection // *Artif. Life.* – 2000. – 5 (4).
4. *Sherwood D.* Global warming and the Gaia theory – a systems approach. Papers presented at the 2004 International Conference of the System Dynamic Society. – Oxford. UK. – 2004. – URL: www.systemdynamic.org.
5. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, – 2000. – 225 с.
6. *Тимченко И.И., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Образование и устойчивое развитие. Системная методология. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, – 2004. – 527 с.
7. *Lovelock J. E.* Gaia: a New Look at Life on Earth. – Oxford: OUP, 1979. – 124 p.
8. *Charlson R., Lovelock J., Andreae M., Warren S.* Ocean phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate // *Nature.* – 1987. – 326. – P. 655 – 661.
9. *Margulis Lynn, Sagan Dorian.* What is Life. – New York: Simon and Schuster, 1995. – 280 p.
10. *Watson A.J., Lovelock J.E.* Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld // *Tellus.* – 1983. – 35B, № 4. – P. 284 – 289.
11. *Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Моделирование эколого-экономических систем. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 321 с.
12. *Качинський А.Б.* Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи. – Киев: Наук. думка, 2003. – 472 с.
13. *Сорос Д.* Кризис мирового капитализма. Открытое общество в опасности. – М.: ИНФРА-М, 1999. – 262 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 11.10.05
После доработки 14.12.05

ABSTRACT The Earth biota processes of global self-regulation (GAIA-theory [1]) are considered using the method of adaptive balance of causes proposed by the authors [5]. The example of the Daisy world model [10] constructed by this method shows the effect of average surface temperature conservation on the planet surface due to the vegetable cover. The integrated model of global natural and socio-economic processes where the World Ocean is one of the factors of regulation of greenhouse gas amount in the atmosphere, is constructed. Lowering of this amount due to the GAIA-effects results in the increase of hurricanes and floods on the Earth that, in its turn, raises the level of ecological and social danger for the population of the Earth. To remove these threads, the processes of the world society self-organization provided by education, science and global control of natural resources consumption are required. Simulation experiment results demonstrating possible scenarios of global development taking into account the processes of the world society self-organization, are represented.