МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА САМОРЕГУЛЯЦИИ ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Е.М.Игумнова[1], С.М.Солодова[1], И.Е.Тимченко[1], И.И.Тимченко[2]

[1]Морской гидрофизический институт НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
[2] Харьковский национальный политехнический университет – ХПИ, г. Харьков
E-mail: timchenko@stel.sebastopol.ua

Эффект саморегуляции глобальной температуры окружающей среды рассмотрен на примере модели DaisyWorld, предложенной для подтверждения GAIA-теории. Предложена новая модель подобного типа, построенная методом адаптивного баланса влияний. На основе этой модели выполнены имитационные эксперименты, которые показали возможность сохранения постоянной средней температуры планеты в условиях роста солнечной радиации. Делается вывод о перспективности АВС метода для моделирования адаптационных процессов в окружающей среде.

В связи с проблемами климата и устойчивого общественно-экономического развития в научной литературе широко обсуждаются эффекты саморегуляции глобальных физических, химических, геологических и биологических процессов. Особое внимание уделяется GAIA теории, в соответствии с которой атмосфера, мировой океан и поверхность Земли – очень тесно связанная между собой система живой материи и окружающей ее среды [1,2]. Автор гипотезы J.Lovelock [1] утверждает, что атмосфера, климат и земная кора управляются биотой таким образом, чтобы обеспечить наилучшие условия для жизни. Температура, окислительные процессы и многие аспекты взаимодействия воды и горных пород сохраняются неизменными. Все это осуществляется благодаря отрицательным обратным связям, обеспечивающим режим адаптивного баланса глобальных процессов.

К одному из наиболее известных явлений подобного рода относится крупномасштабная саморегуляция температуры. Уже около 4 миллиардов лет средняя температура Земли колеблется в узком диапазоне значений: 10 – 22 ^{0}C, несмотря на то, что солнечная радиация за этот период увеличилась на одну треть. Для объяснения этого эффекта выдвинуты две основных гипотезы. Прежде всего, под действием микроорганизмов, лишайников, корней растений и др. происходит разрушение и измельчение скальных пород, что приводит к их выветриванию. Повышение температуры усиливает этот процесс, продуцирующий нутриенты, которые многие из живых организмов могут использовать для своего роста и распространения по поверхности суши. Рост зеленой массы растений, в свою очередь, уменьшает содержание CO_2 в атмосфере и понижает температуру поверхности Земли.

Второй механизм саморегуляции температуры связан с развитием морских водорослей. С ростом температуры количество водорослей возрастает. Они поглощают атмосферный CO_2, тем самым также понижая среднюю температуру. Заметим, что морские водоросли оказывают влияние и на локальную температуру приводного слоя океана. В процессе их отмирания образуется газ (диметилсульфид), который выделяется в атмосферу и создает в ней сульфатные аэрозоли. Последние служат ядрами конденсации для образования облачности, уменьшающей солнечную радиацию и понижающей температуру приводного слоя атмосферы [3].

Сложные бактериальные процессы поддерживают постоянным отношение концентраций азота и фосфора в морской воде, в фито и зоопланктоне. Кроме того, несмотря на вынос в море в огромных количествах минеральных веществ с поверхности суши, сохраняется постоянная соленость морской воды.

Моделирование эффектов саморегуляции в модели DaisyWorld. Одна из первых моделей, имитирующих глобальные процессы саморегуляции температуры, была построена в ответ на критицизм, вызванный GAIA-теорией [4]. Модель получила название DaisyWorld. Она имитировала 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 от температуры GF

$$GF = 1\text{-}0.003265(22.5\text{-}T)^2. \quad (1)$$

Белые маргаритки отражали солнечный1 свет, а черные – поглощали его. 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 населения планеты к постепенно растущему внешнему воздействию – увеличению солнечной радиации.

В начале эксперимента температура планеты была настолько низкой, что только малая часть черных маргариток могла выжить. Как следует из соотношения (1), наилучшим условием для этого является температура $T = 22.5\ ^0C$. По мере роста температуры планеты наступали условия гомеостазиса 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. При некоторой температуре наступало равновесие: дальнейшему повышению температуры препятствовали белые маргаритки, отражавшие тепловую энергию, а понижение температуры увеличивало количество черных маргариток, поглощавших тепло. Каждый вид маргариток действовал по своим правилам, однако объединенная система приобрела новое качество – стабильность температуры, поддерживаемую механизмом адаптации. Таким образом, в модели была продемонстрирована возможность саморегуляции глобальных процессов поглощения и отражения солнечной энергии. Эффект саморегуляции проявился как эмерджентное свойство системы.

Построение модели DaisyWorld методом АВС. Высказанная Лавлоком идея саморегуляции глобальной температуры Земли означает наличие адаптивной подстройки процессов, формирующих эту температуру, под внешнее влияние – растущее солнечное излучение. Адаптивная подстройка под внешние влияния осуществляется в методе Адаптивного баланса влияний (АВС методе), предложенном в работе [5]. Метод исходит из предположения о том, что для существования динамического равновесия системы с приложенными к ней внешними влияниями необходимы отрицательные обратные связи, контролирующие тенденции к изменению состояния баланса системы. В методе АВС используются системы обыкновенных дифференциальных уравнений, в правых частях которых содержатся две базовые функции влияния, обеспечивающие подобные отрицательные обратные связи влияния $F^{(-)}(x)$ и $F^{(+)}(x)$. Эти функции зависят от значений параметра состояния x таким образом, что выполняется условие баланса влияний

$$F^{(-)}(x) + F^{(+)}(x) = 1. \quad (2)$$

Как основное уравнение, представляющее динамику непрерывного процесса, используется следующее выражение

$$dx / dt = F^{(-)}(x)x - F^{(+)}(x)x. \quad (3)$$

Если в качестве функции $F^{(+)}(x)$ выбрать непрерывную монотонно растущую функцию, то в силу условия (2) функция $F^{(-)}(x)$, будет также непрерывной и монотонно убывающей. Нетрудно видеть, что уравнение (3) при любых начальных условиях имеет решение, которое соответствует точке пересечения графиков этих функций.

Пусть имеются n переменных: $x_1, x_2, \ldots, x_n$, 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

$$x_i = a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + a_{i3} x_3 + \ldots + a_{in} x_n, \quad \text{при } a_{ii} = 0, \quad (4)$$

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

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

$$dx_i /dt = x_i\ [1- 2\ F^{(+)}\ (a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + a_{i3} x_3 + \ldots + a_{in} x_n + x_i)]. \quad (5)$$

Необходимая для сохранения баланса отрицательная обратная связь обеспечивается одной из базовых влияющих функций, например $F^{(+)}(x_i)$, которая должна быть положительной и монотонно растущей. Если выбрать наиболее простой вариант линейной зависимости этой функции от своего аргумента

$$F^{(+)}(x_i) = a_{i1}\,x_1 + a_{i2}\,x_2 + a_{i3}\,x_3 + \ldots + a_{in}\,x_n + x_i,$$

то уравнение (5) принимает форму нелинейного уравнения Бернулли:

$$dx_i/dt = x_i - 2(a_{i1}\,x_1\,x_i + a_{i2}\,x_2\,x_i + a_{i3}\,x_3\,x_i + \ldots$$
$$\ldots + a_{in}\,x_n\,x_i + x_i^2). \qquad (6)$$

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

Рассмотрим процессы саморегуляции глобальной температуры в модели ABC DaisyWorld, которая показана на рис.1.

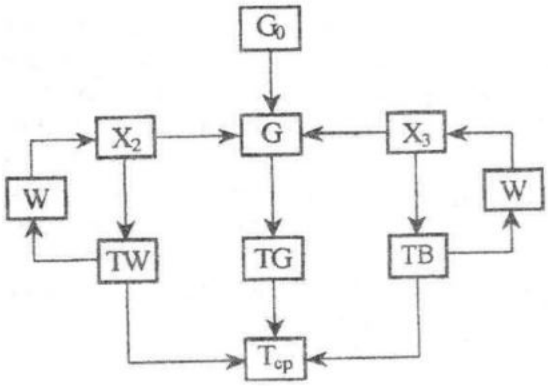

Рис. 1 – Концептуальная модель ABC DaisyWorld

Средняя температура планеты $T_{ср}$ зависит от тех количеств тепла, которое поглощается каждой их 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 имеет альбедо 0,25, а часть G имеет альбедо 0,5. Общую площадь поверхности планеты обозначим G_0, а интенсивность солнечного излучения SR(t), где t - время.

В отличие от эксперимента работы [4], будем использовать гауссовскую кривую W для описания пределов изменения температуры планеты, при которых возможно существование маргариток

$$W = \exp\,[-\,0{,}1(22{,}5 - T)^2], \qquad (7)$$

где T равно TW или TB.

При этих условиях уравнения (6) дают следующую динамическую модель ABC DaisyWorld:

$$dx_2/dt = x_2\,\{1\text{-}2\,[x_2 - a_{TW}\,SR(t)x_2 \times$$
$$\times (\exp\,[-\,0{,}1(22{,}5 - TW)^2)]]\};$$

$$dx_3/dt = x_3\,\{1\text{-}\,2\,[x_3 - a_{TB}\,SR(t)x_3 \times$$
$$\times (\exp\,[-\,0{,}1(22{,}5 - TB)^2)]]\}; \qquad (8)$$

$$G = G_0 - X_2 - X_3.$$

Вычислительные эксперименты с моделью ABC DaisyWorld. Вычислительный эксперимент должен был показать реакцию модели на рост солнечной радиации падающей на планету. С этой целью был имитирован линейный рост падающего излучения, показанный на рис. 2а.

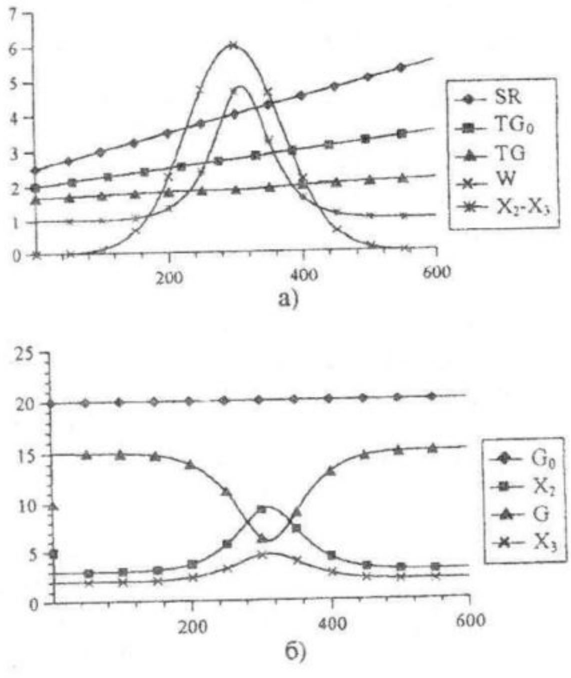

Рис. 2 – Результаты вычислительного эксперимента с моделью ABC DaisyWorld

В первом эксперименте рассматривались условия отсутствия на планете живых форм – черных и белых маргариток. В целях упрощения средняя температура планеты считалась пропорциональной количеству тепла, поглощенного ее площадью G_0. Линия роста температуры планеты для этого случая изображена на рис. 2а.

Во втором эксперименте были построены сценарии расселения по планете черных и белых маргариток. Уравнения (8) позволили рассчитать динамику площадей, занимаемых каждым из видов в условиях такого же, как и в первом эксперименте, роста солнечной радиации. Сценарии расселения видов, полученные с учетом лимитирующего фактора (7), приведены на рис. 2б. Для большей наглядности кривые X_2 и X_3 смещены вверх от начального нулевого уровня. Соответствующий этим сценариям временной ход средней температуры планеты показан на рис. 2а.

Как следует из этого рисунка, существование двух форм жизни на планете в период времени эксперимента с 200 по 400 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 перспективности использования метода АВС для изучения глобальных процессов адаптации живой и неживой природы, относящихся к GAIA-теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Lovelock. Gaia: The Practical Science of Planetary Medicine. Gaia Books Limited. London. 1991.

2. Margulis, Lynn, & Sagan, Dorian, "What is Life", Simon & Schuster, New York, 1995.

3. R. Charlson, J. Lovelock, M. Andreae, and S. Warren. Ocean phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate. *Nature*, 326:655-661, 1987.

4. A.J. Watson, and J.E. Lovelock. 1983. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. Tellus 35B:284.

5. И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова, И.И.Тимченко. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. "Экоси-гидрофизика", – Севастополь, 2000. – 225 с.

6. И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова, И.И.Тимченко. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. "Экоси-гидрофизика", – Севастополь. 2004. – 527 с.