

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОСФЕРЫ

В.В. Коробицын

This article is demonstrate the simulated result of global dynamic processes of Biosphere. The model of Biosphere is a system of 24 non-linear differential equation. The model of Biosphere is a part of Society's model.

1. Введение

Данная статья освещает результаты компьютерного моделирования глобальных динамических процессов биосферы Земли. Для моделирования была использована математическая модель биосферы, предложенная коллективом авторов в книге [4]. Их исследования проводились в 70-е годы, а поскольку в то время не было столь мощного компьютерного оборудования, какое есть сейчас, то их модель не была реализована на ЭВМ. Поэтому возникла идея создать компьютерную модель биосферы. Кроме того, биосфера является первым (базовым) уровнем человеческого общества, а для построения модели всего общества необходимо реализовать все его уровни: биосфера, этносфера, социосфера и психосфера (см. [2], [3]).

Модель биосферы представляет собой динамическую непрерывно-детерминированную систему. Она состоит из 24 подсистем, каждая из которых взаимодействует с другими подсистемами. Математическая модель системы представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. В правой части этих уравнений стоят функции, зависящие от компонентов системы и от времени. В начальный момент времени заданы значения компонентов системы, то есть поставлена задача Коши:

$$\vec{y}' = \vec{f}(\vec{y}, t); \quad \vec{y}(t_0) = \vec{y}_0.$$

Эта модель разработана и представлена авторами книги [4]. В своих исследованиях я использовал упрощенную модель. Упрощение заключалось в том, что Земля была представлена не как совокупность большого числа слабозаимодействующих геобиоценозов, а как один глобальный геобиоценоз. В данной

© 1999 В.В. Коробицын

E-mail: korobits@univer.omsk.su

Омский государственный университет

статье я приведу описание одного уравнения, описывающего динамику развития подсистемы фитопланктона в океане. Остальные уравнения можно найти в [2], [4].

2. Описание модели биосферы

Систему биосферы можно разделить на 3 блока подсистем: океан, суша и атмосфера. Блок океана составляют: углерод верхних слоев океана, углерод глубинных слоев, биомасса фитопланктона, биомасса nekтона и биомасса детрита, вода океана. Блок суши: население, животные, лесная растительность, травяная растительность, сельскохозяйственная растительность, гумус, минеральные ресурсы, основной капитал, сельскохозяйственные инвестиции, антропогенные загрязнения, поверхностная вода, грунтовая вода, биологическая вода, вода в замёрзшем состоянии. Блок атмосферы: углекислый газ, кислород, запыленность атмосферы, вода атмосферы.

Первоисточником энергии и вещества для всех форм жизни в океане является фитопланктон — микроскопические одноклеточные растения. Продукция фитопланктона получается в результате процесса фотосинтеза, то есть биомасса наращивается за счет воздействия солнечной радиации. Биомасса фитопланктона является источником питания для nekтона. Нектон — это совокупность океанических животных, отличающихся крупными размерами, способными к самостоятельному передвижению и имеющих промысловое значение. Нектонные организмы могут питаться как растительной, так и животной пищей. Отмирающие nekтонные организмы и отходы переработанной пищи образуют мелкие частицы органического вещества или частично минерализованного вещества, взвешенные в толще воды или осевшие на дно океана, называемые детритом. Детрит постепенно распадается в частицы углерода в верхних или глубинных слоях океана.

Основная биомасса суши сосредоточена в растениях, животных и людях. Причем биомасса зеленых растений составляет 99,2 % от всей биомассы суши. Продукционный процесс наземных растений состоит из четырех фундаментальных процессов: фотосинтеза, дыхания, роста и отмирания. Процесс фотосинтеза обеспечивает прирост биомассы растений за счет поглощения солнечной радиации и углекислого газа. Процесс дыхания обеспечивает снабжение энергией различных биохимических процессов синтеза. В процессе роста происходит увеличение растений, при этом затрачивается органическое вещество, накопленное в органах растений. В процессе отмирания происходит переход растительной биомассы в биомассу гумуса — плодородной части почвы. Растительность суши разделяется на три основных типа: лесная, травяная и сельскохозяйственная. Растительность служит основой питания для животных и человека.

Подсистема роста численности населения самая сложная в этой системе — это связано с большим количеством факторов, влияющих на изменение численности: обеспеченность пищей, концентрация кислорода и углекислого газа в атмосфере, загрязнение окружающей среды, материальный уровень обеспеченности

населения. Численность населения оказывает сильное влияние на потребление минеральных ресурсов, накопление основных фондов и выделение сельскохозяйственных инвестиций, а также накопление и переработку антропогенных загрязнений.

Антропогенные загрязнения оказывают огромное влияние на замутненность атмосферы, изменение концентрации углекислого газа и кислорода в атмосфере. Переработкой углекислого газа занимается растительность, которая, поглощая его, выпускает кислород.

Необходимыми компонентами системы являются подсистемы, описывающие влагопотоки: вода океана, поверхностная вода, грунтовая вода, вода в замерзшем состоянии, биологическая вода и вода атмосферы. Основные запасы воды на планете содержатся в океане. Поверхностная вода суши с потоками рек попадает в океан, а, испаряясь с поверхности океана, попадает в атмосферу. Затем с осадками вода попадает опять на сушу в поверхностные и грунтовые воды. Грунтовая вода с минеральными веществами поглощается растениями и превращается в биологическую воду, которая испаряется с поверхности листа при фотосинтезе. Примерно так выглядит круговорот воды в биосфере. Вода в замерзшем состоянии (ледники) практически не входит в круговорот, хотя такая возможность не исключена.

Далее я привожу описание одного уравнения системы. Это уравнение изменения биомассы фитопланктона. Оно дает общее представление о всей системы.

3. Пример одного уравнения

Продукция биомассы фитопланктона $\Phi, t/\text{км}^2$ описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d\Phi}{dt} = R_{\Phi} - M_{\Phi} - T_{\Phi} - \Sigma_{\Phi} - R_r,$$

где, приток биомассы планктона $R_{\Phi} = \min(\rho_{\Phi}\Phi, R_{\Phi\Phi})$ ограничивается линейной функцией от биомассы, ρ_{Φ} – коэффициент максимальной продуктивности фитопланктона.

$$R_{\Phi\Phi} = k_{\Phi} H_{\Phi\Phi} H_{\Phi E} H_{\Phi C} H_{\Phi Z} H_{\Phi T}$$

- учет различных факторов ограничения прироста биомассы. Если предположить, что функции $H_{\Phi\Phi}, H_{\Phi E}, \dots$ принимают максимальное значение, равное единице, то коэффициент k_{Φ} показывает максимально возможный прирост биомассы при идеальных условиях.

$$H_{\Phi\Phi} = \exp\left(-\frac{b_{\Phi}}{\Phi}\right)$$

- учет избытка или недостатка биомассы планктона; b_{Φ} - параметр, отражающий лимитирование скорости фотосинтеза недостатком или избытком биомассы.

$$H_{\Phi E} = \frac{E}{E_{\Phi}^*} \exp\left(1 - \frac{E}{E_{\Phi}^*}\right), \quad E = E_0 \exp(-\alpha B - \beta),$$

- учет изменения скорости фотосинтеза от изменения освещенности; E_0 - исходная энергия солнечной радиации; B - замутненность атмосферы; β - показатель прозрачности «чистой» атмосферы; α - показатель изменения прозрачности атмосферы от ее замутненности; E_{Φ}^* - оптимальный для фотосинтеза уровень освещенности.

$$H_{\Phi C} = \frac{a_{\Phi C} C_2}{C_{\Phi} + C_2}$$

- учет изменения концентрации углерода верхнего слоя океана C_2 , увеличение которой приводит к повышению скорости фотосинтеза, а, следовательно, к увеличению продуктивности фитопланктона. Здесь C_{Φ} - содержание углерода в биомассе фитопланктона; $a_{\Phi C}$ - коэффициент влияния концентрации углерода на продуктивность фитопланктона.

$$H_{\Phi Z} = \exp(-d_{\Phi} \theta_{\Phi r Z}), \quad \theta_{\Phi r Z} = \theta Z \frac{\sigma_H}{\sigma_O}$$

- учет влияния загрязнений на продуктивность фитопланктона, увеличение загрязнений ведет к понижению продуктивности. Здесь d_{Φ} - коэффициент влияния загрязнений на продуктивность фитопланктона; $\theta_{\Phi r Z}$ - доля загрязнений попадающих в океан; σ_H - площадь суши; σ_O - площадь океана; Z - плотность загрязнений суши; θ - коэффициент попадания части загрязнений в океан.

$$H_{\Phi T} = 1 + \frac{\alpha_{\Phi T}}{100} \Delta T$$

- учет изменения глобальной температуры Земли, увеличение которой приводит к увеличению продуктивности фитопланктона. Здесь ΔT - величина изменения глобальной температуры; $\alpha_{\Phi T}$ - параметр, показывающий на сколько процентов увеличится продуктивность фитопланктона при изменении температуры на $1^{\circ}C$.

$$M_{\Phi} = (\mu_{\Phi} + \mu'_{\Phi} \Phi) \Phi$$

- смертность фитопланктона; μ_{Φ} - показатель постоянной смертности; μ'_{Φ} - показатель смертности, обусловленной перенасыщенностью биомассы фитопланктона.

$$T_{\Phi} = \tau_{\Phi} \Phi$$

- энергетические затраты, τ_{Φ} - показатель зависимости объемов энергетических затрат от биомассы фитопланктона.

$$\Sigma_{\Phi} = \Phi \frac{k_{G\Phi}}{V_G} R_G$$

- использование фитопланктона на нужды населения; $k_{G\Phi}$ - коэффициент, определяющий объемы использования фитопланктона; V_G - обеспеченность пищей населения; R_G - приток биомассы в подсистему населения.

4. Результаты компьютерного моделирования

В данной работе приведены результаты компьютерного моделирования биосферных процессов. Основной сложностью при моделировании оказалось нахождение коэффициентов, входящих в систему, тем более что их количество оказалось более трехсот. Процесс моделирования протекал поэтапно — начиная с одного-двух уравнений, постепенно увеличивалось их число. При добавлении уравнений происходила доработка предыдущих. В итоге была получена компьютерная модель с заданными коэффициентами. Результаты, полученные с помощью этой модели, согласуются с современными представлениями об эволюции биосферы. Ниже приводятся графики решений по каждой системе и комментарии к ним.

4.1. Лесная растительность

Моделирование биосферы Земли проводилось без деления территории на регионы (геобиоценозы). Значения подсистем выбирались как средние значения по всем регионам. Например, плотность лесной растительности, равная $2500\text{т}/\text{км}^2$, означает среднюю плотность по всем лесным регионам суши, общей площадью в 40млн.км^2 . Скажем, в тайге эта плотность составляет $20000\text{т}/\text{км}^2$, а в редколесье $200\text{т}/\text{км}^2$. Поэтому в дальнейшем необходимо будет разделить территорию на регионы с различной плотностью, учитывая различия в динамике развития.

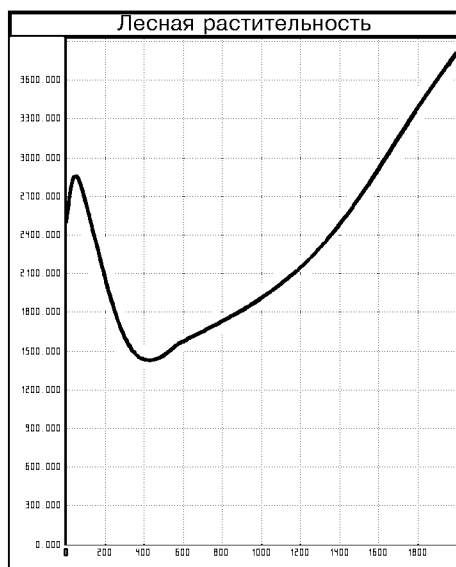


Рис.1

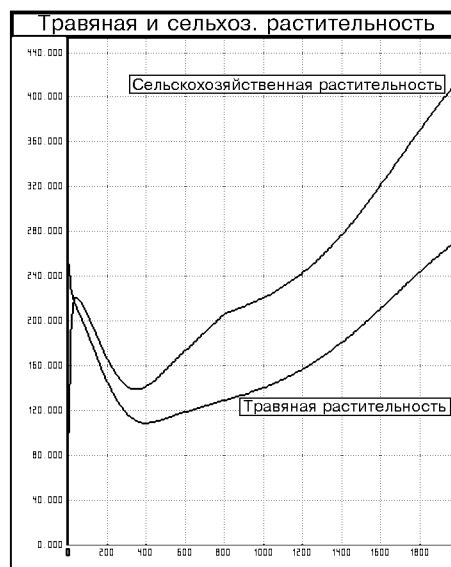


Рис.2

На рис.1 приведена кривая развития подсистемы *Лесной растительности*. Судя по этой кривой, с началом роста населения (рис.3) увеличивается потребление продукции лесной растительности и, соответственно, падает ее плотность. Кроме того, с ростом населения увеличиваются объемы загрязнений (рис.8) и замутненность атмосферы (рис.15), что тоже снижает объемы роста

лесной растительности. Но в районе 400 лет происходит надлом в процессе снижения плотности лесной растительности. Этот надлом обусловлен изменением политики общества по отношению к природе (п.3.2.6, 3.2.7). В этот момент меняется позиция общества в вопросе восстановления минеральных ресурсов и переработки загрязнений (рис.8,15) — увеличивается количество средств, выделяемых на восстановление ресурсов, и уменьшается стоимость работ по переработке загрязнений. Помимо этих факторов, на увеличение лесной растительности после 600 лет оказывает влияние и увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере (рис.12), и повышение глобальной температуры Земли (рис.16), и увеличение количества осадков (рис.17). Влияние всех этих факторов описаны дифференциальным уравнением для подсистемы лесной растительности (п.3.2.1), а приведенные результаты расчетов подтверждают это.

4.2. Травяная и сельскохозяйственная растительность

Кривые динамики *Травяной* и *Сельскохозяйственной растительности* похожи на уже описанную кривую динамики лесной растительности. И это верно, потому что на эти подсистемы оказывают влияние те же факторы, что и на подсистему лесной растительности. За исключением лишь того факта, что развитие аграрной науки и техники приводит к более интенсивному росту сельскохозяйственной растительности, подтвержденного рис.2.

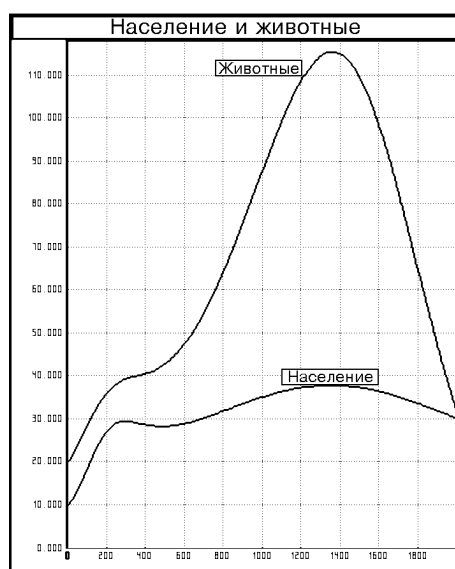


Рис.3

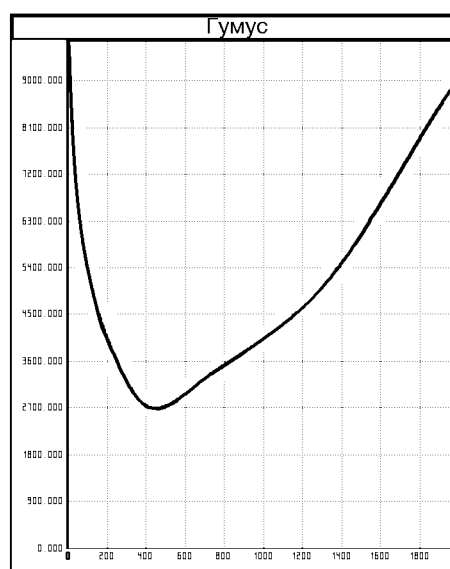


Рис.4

4.3. Население и животные

Кривые динамики плотности *Населения* и *Животных* изображены на рис.3. Эти кривые схожи между собой, за исключением того, что на увеличение численности населения отрицательное влияние оказывает больше факторов, чем на увеличение численности животных. Это связано и с этническими, и с со-

циальными факторами. Всевозможные войны и конфликты, гонения и национальные предпочтения и даже высокая материальная обеспеченность населения оказывают отрицательное влияние на увеличение численности населения. Поэтому, как видно на рис.3, процесс увеличения численности населения идет менее интенсивно, чем увеличение численности животных. Но и уменьшение численности населения идет медленнее, чем у животных, — это связано с социальными факторами защиты населения от уменьшения рождаемости и увеличения смертности.

Кривые плотности населения и плотности животных поднимаются на протяжении первых 200 лет, и вместе с этим падает обеспеченность пищей — уменьшаются объемы лесной и сельскохозяйственной растительности. Когда обеспеченность пищей достигает минимума, то численность населения достигает максимума, и дальше происходит спад численности населения. Далее, с увеличением лесной, травяной и сельскохозяйственной растительности, происходит подъем численности населения и животных. Достигая очередного максимума, происходит спад.

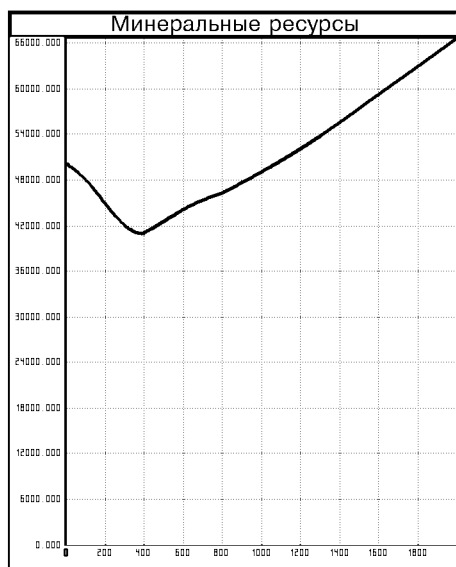


Рис.5

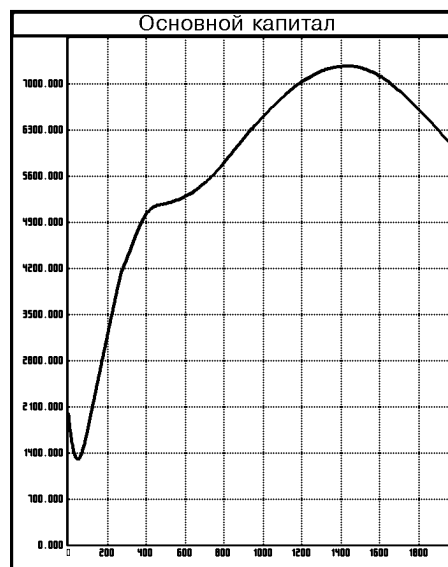


Рис.6

4.4. Гумус

На рис.4 изображена кривая динамики подсистемы *Гумус*. Поскольку биомасса гумуса складывается из биомассы отмирающих растений и отходов жизнедеятельности животных и людей, то на первом этапе, когда падает производительность растительной биомассы, происходит истощение запасов гумуса, восстановление которых происходит с увеличением производительности растительной биомассы.

4.5. Минеральные ресурсы

Динамика потребления и восстановления *Минеральных ресурсов* (рис.5) демонстрирует общую картину развития цивилизации. В данном эксперименте ситуация складывается достаточно оптимистично, общество «поворачивается» лицом к природе, что проявляется в восстановлении минеральных ресурсов. Если предположить, что в районе 400 лет перелома не произошло бы, то биосфера продолжала бы погибать, и это привело бы к ее полному уничтожению.

4.6. Основной капитал

Кривая накопления *Основного капитала* (рис.6) ведет себя так же, как и кривая плотности населения. И это понятно, ведь накопление капитала идет за счет населения — в уравнении (п.3.2.7) член со знаком «плюс» пропорционален плотности населения.

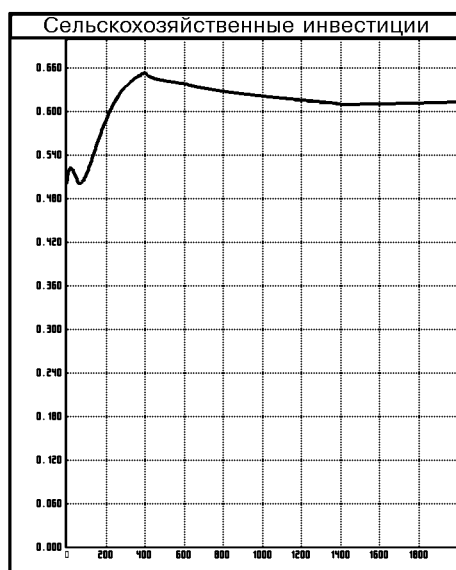


Рис.7

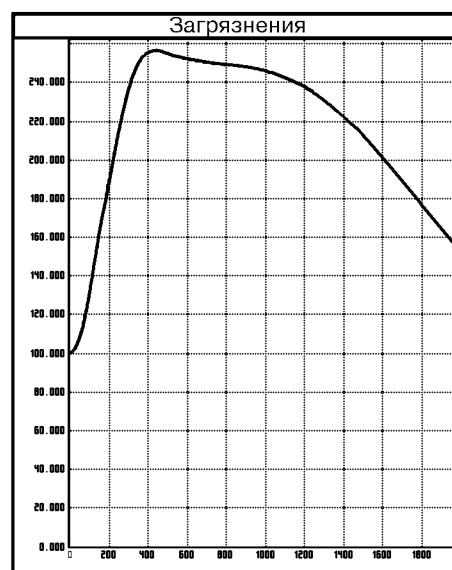


Рис.8

4.7. Сельскохозяйственные инвестиции

Кривая *Сельскохозяйственных инвестиций* отражает характер капиталовложений в сельское хозяйство. С уменьшением обеспеченностью пищей общество вкладывает в сельское хозяйство все больший капитал, пытаясь накормить население. Когда же количество пищи увеличивается, инвестиции в сельское хозяйство уменьшаются, что и продемонстрировано на рис.7.

4.8. Антропогенные загрязнения

Кривая *Антропогенных загрязнений* (рис.8) отражает характер загрязнений, производимых человеком. Загрязнения нарастают с ростом населения, но, как я уже отмечал, в данной модели предусмотрена политика смены отношения

общества к природе. Это выражается в том, что в районе 400 лет происходит изменение в политике переработки загрязнений — большой объем капитала вкладывается в переработку загрязнений. Кроме того происходит уменьшение стоимости переработки загрязнений за счет улучшений технологий.

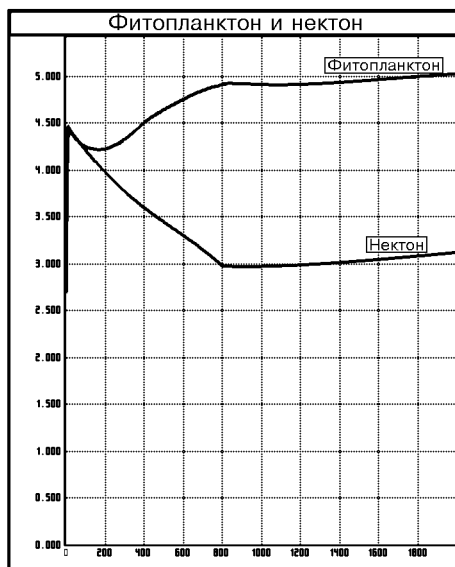


Рис.9

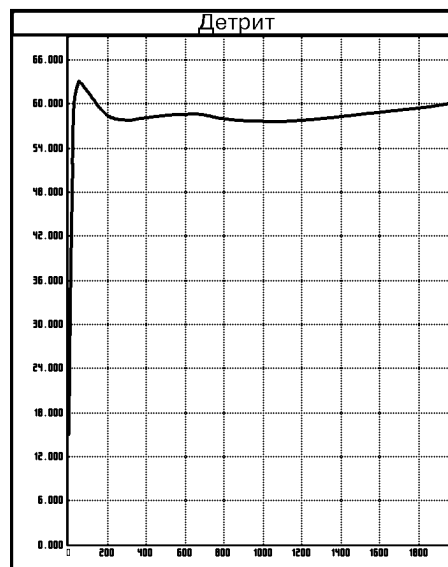


Рис.10

4.9. Фитопланктон и нектон

Кривые динамики плотности биомассы *Фитопланктона* и *Нектона* изображены на рис.9. В океане единственным источником энергии и вещества для всех форм жизни служит первичная продукция фитопланктона. При этом извне поступает только энергия солнечной радиации. Первичная продукция фитопланктона лимитируется освещенностью и концентрацией биогенных элементов. Изменение биомассы нектона зависит от концентрации фитопланктона и загрязненности океана.

На рис.9 видно, как падает биомасса нектона на протяжении 800 лет — это обусловлено, в первую очередь, увеличением загрязненности океана (рис.8). После 800 лет происходит спад загрязненности океана, что приводит к стабилизации объема биомассы нектона и дальнейшему его увеличению. Биомасса фитопланктона в первые 800 лет растет — это связано с падением биомассы нектона, и концентрация биомассы стабилизируется после 800 лет.

4.10. Детрит

Биомасса *Детрита* (рис.10) в целом остается постоянной. Прибыль биомассы за счет отмирания нектона и фитопланктона уравновешивается разложением детрита в верхних и глубинных слоях океана.

4.11. Кислород

Процентное содержание *Кислорода* в атмосфере (рис.11) постепенно уменьшается — это связано с увеличением концентрации углекислого газа (рис.12) и с безвозвратными потерями кислорода в антропогенной среде.

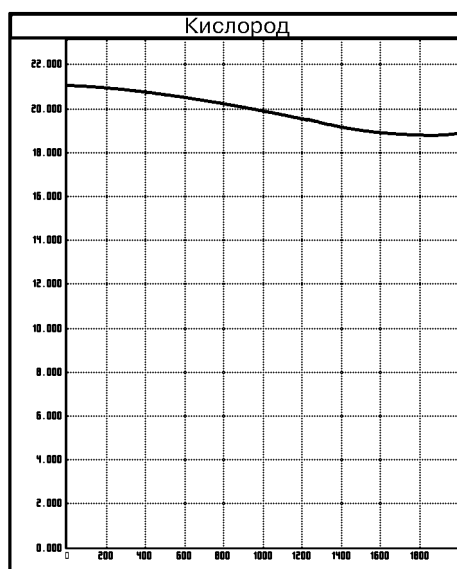


Рис.11

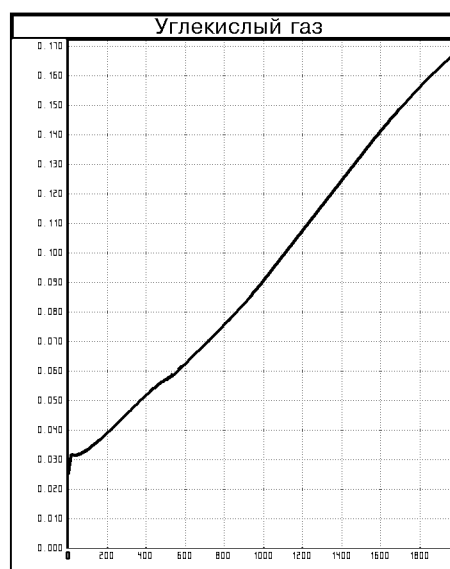


Рис.12

4.12. Углекислый газ

Концентрация *Углекислого газа* в атмосфере (рис.12) постоянно увеличивается — это связано с постоянным отмиранием организмов и их разложением, сопровождаемым выделением углекислого газа, а также с сжиганием различных видов топлива.

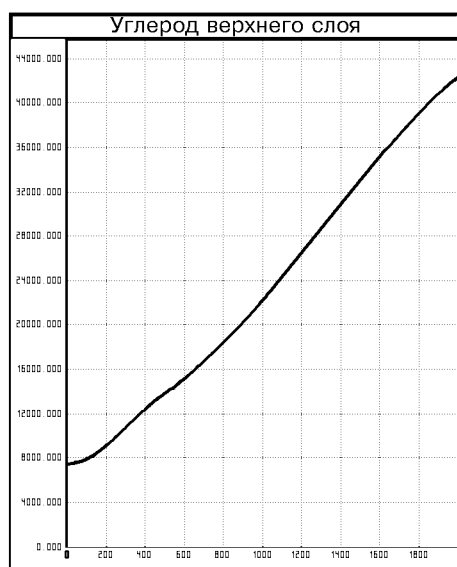


Рис.13

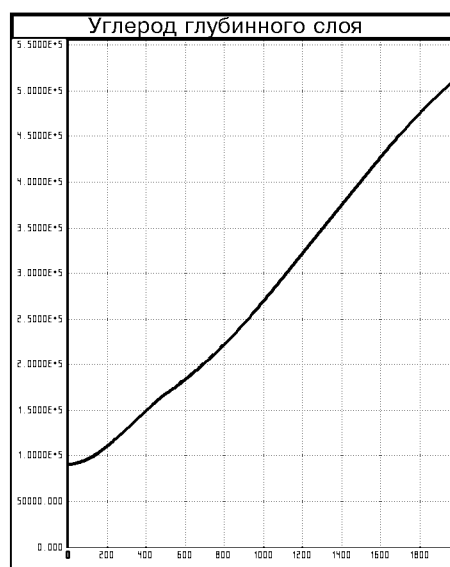


Рис.14

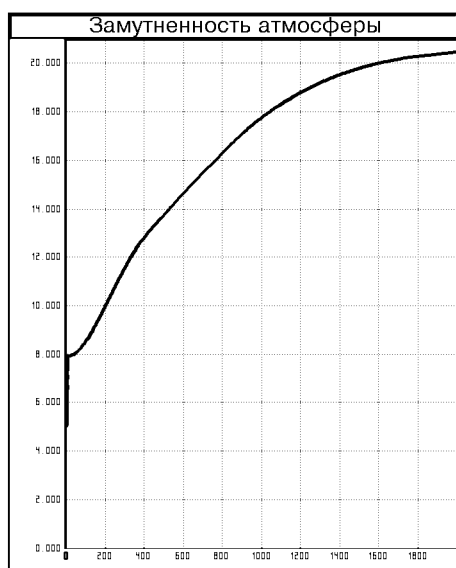


Рис.15

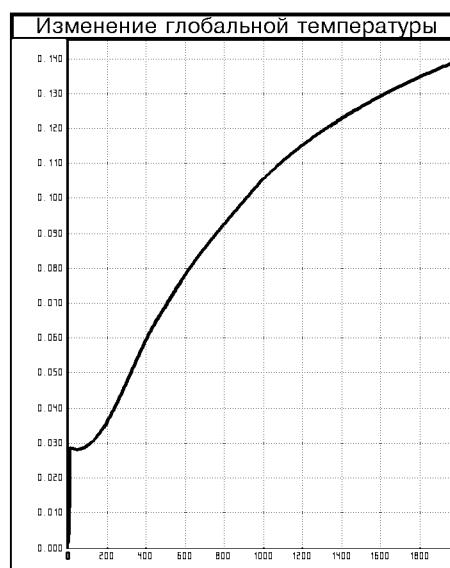


Рис.16

4.13. Углерод верхнего и глубинного слоев океана

Масса Углерода верхнего и Глубинного слоев океана (рис.13,14) постоянно увеличивается — это обусловлено разложением детрита в океане, сопровождаемого выделением углерода. А поглощение углерода фитопланктоном при фотосинтезе происходит в гораздо меньших размерах, чем его выделение при разложении.

4.14. Замутненность атмосферы

Замутненность атмосферы увеличивается со временем (рис.15), что приводит к уменьшению солнечной радиации, а, следовательно, к уменьшению продуктивности растительности и понижению глобальной температуры. Помимо естественных загрязнителей атмосферы (выветривание, эрозия и т.п.), существуют антропогенные — промышленная грязь и пыль, радиоактивные вещества, выхлопные газы различных транспортных средств, дым, молекулярные примеси и т.п.

4.15. Изменение глобальной температуры

Кривая изменения Глобальной температуры Земли изображена на рис.16. Температура на Земле зависит от солнечной радиации. А так как в данной модели энергия солнечной радиации взята постоянной, то температура в основном зависит от замутненности атмосферы. Увеличение замутненности ведет к понижению глобальной температуры. Но, как мы видим на рис.16, температура Земли повышается — это обусловлено увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере (парниковый эффект) (рис.12).

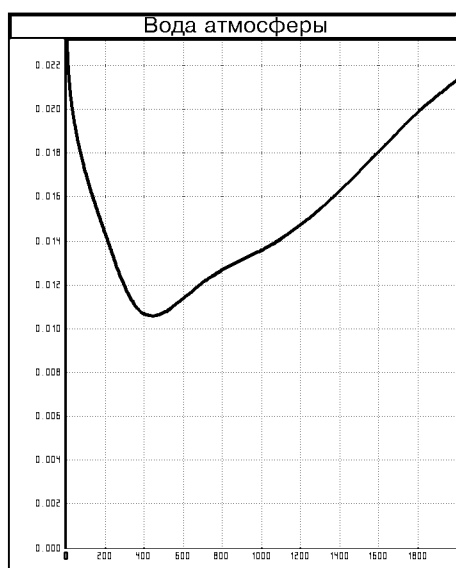


Рис.17

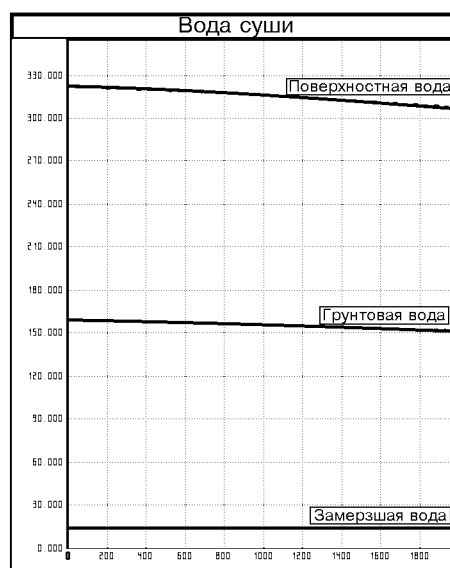


Рис.18

4.16. Круговорот воды

Объемы воды атмосферы измеряются разностью расхода воды на осадки и прихода от испарения. Испарение почвенной влаги происходит как непосредственно с поверхности, так и путем транспирации растениями. Скорость испарения зависит от освещения, температуры, состояния растительного покрова и почвы. При этом одним из важных звеньев в процессе влагооборота является биологическая вода, так как большая часть воды, испаряющейся с суши, поступает в атмосферу из почвы путем транспирации. Известно, что в настоящее время около 12 % суммарного испарения с земной поверхности осуществляется растениями в процессе фотосинтеза.

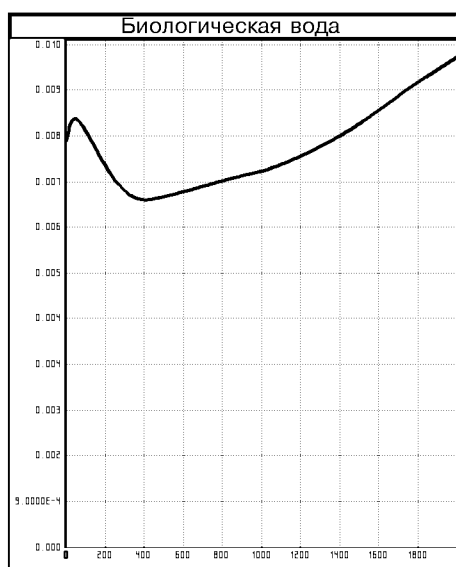


Рис.19

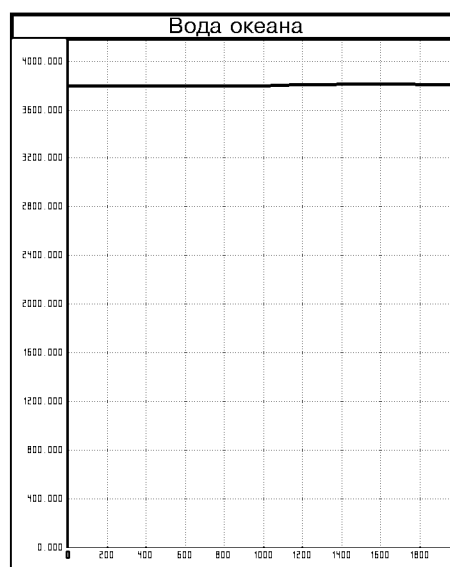


Рис.20

Уменьшение объемов растительности (рис.1,2) приводит к уменьшению объемов *Биологической воды* (рис.19) и, как следствие, уменьшению *Воды атмосферы* (рис.17).

Объемы *Поверхностной* и *Грунтовой воды* (рис.18) постепенно уменьшаются — это связано с безвозвратными потерями пресной воды.

Вода в замерзшем состоянии (рис.18) практически не входит во влагооборот, и ее объемы меняются незначительно.

Объемы *Воды океана* (рис.20) достаточно велики и поэтому меняются достаточно медленно.

5. Заключение и выводы

Главным результатом данной работы является «живая» модель биосферы Земли. Под этим я подразумеваю наличие модели, которая существует не только на бумаге, но и в компьютере, а значит, она может функционировать. С помощью этой модели можно проводить эксперименты, получать результаты, смотреть, что может произойти при тех или иных условиях.

Кроме того, построение этой модели дает возможность проводить дальнейшее моделирование — наращивать эту модель. Модели этногенеза и социогенеза надстраиваются над моделью биогенеза. Синтез всех этих моделей поможет построить реальную модель человеческого общества. Если в дальнейшем мне удастся присоединить эти модели, то из модели биосферы, скорее всего, исчезнут ступенчатые и кусочно-линейные функции, которые характеризуют поведение общества. Эти функции будут заменены компонентами других систем — этнической или социальной. А это значит, исчезнут те условности, которые мешают нормальному функционированию системы.

Эта модель также нуждается в большей ее детализации — необходимо разделить сушу и океан на регионы, в которых климатические и геологические условия меняются незначительно. Это помогло бы получить более точную модель биосферы, которая бы адекватнее реагировала на местные возмущения, позволяла бы проводить исследования экологических катастроф в отдельных регионах, учитывая состояние всей биосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гумилев Л.Н. *Этногенез и биосфера Земли*. – М.: «ДИ-ДИК», 1994.
2. Гуц А.К. *Глобальная этносоциология*. – Омск: ОмГУ, 1997.
3. Гуц А.К., Коробицын В.В. *Компьютерное моделирование этнических процессов*. // Деп.в ВИНТИ 24.09.97, N 2903 – В97. – 23с.
4. Крапивин В.Ф., Свирижев Ю.М., Тарко А.М. *Математическое моделирование глобальных биосферных процессов*. – М.: Наука, 1982.