
УДК 519.6

С. И. Барцев *, д-р физ.-мат. наук,
А. Л. Щемель **, канд. физ.-мат. наук, **Ю. Д. Иванова** ***, канд. техн. наук
Институт биофизики СО РАН
(Россия, 660036, Красноярск, Академгородок 50, строение 50;
тел. +73912494328, E-mail: bartsev@yandex.ru *,
andong.china@gmail.com **, lulja@yandex.ru ***)

Минимальная биосферная модель для прогноза наихудшего варианта биосферной динамики в пределах неопределенности оценки параметров¹

Рассмотрено влияние варьирования параметров минимальной биосферной модели на ее динамику. Показано, что способность лесов накапливать углерод в биомассе, приводящая к уменьшению глобального потепления, повышает риск запуска необратимых катастрофических изменений в будущем.

Розглянуто вплив варіювання параметрів мінімальної біосферної моделі на її динаміку. Показано, що здатність лісів накопичувати вуглець у біомасі, що приводить до зменшення глобального потепління, підвищує ризик запуску незворотних катастрофічних змін у майбутньому.

К л ю ч е в ы е с л о в а : минимальные биосферные модели, цикл углерода, устойчивость биосферы.

Изучение биосферы представляет собой весьма сложную задачу. Ни с технической, ни с морально-этической точки зрения невозможно провести традиционный эксперимент над нашей планетарной экосистемой. Одним из возможных и эффективных способов изучения систем подобного масштаба и значимости является применение подходов математического моделирования. Такой подход развивается уже несколько десятилетий. Сложившиеся в этой области знаний традиции определяют путь к адекватности модели через ее максимальную детализацию. Чем подробнее представлено функциональное и пространственное разнообразие исходной системы, тем более достоверными будут результаты работы системы модельной. Но высокий уровень детализации, а следовательно, большое число уравнений и параметров системы неизбежно приводят к определенным трудностям,

¹ Работа поддержана интеграционным проектом СО РАН № 50.

например появлению артефактов в результате ошибок компьютерного программирования. Однако самой главной проблемой является накопление неопределенностей в прогнозах в результате неизбежной неопределенности в экспериментальной оценке модельных параметров.

В конечном счете, можно утверждать, что претензия распределенных многомерных моделей на точность описания биосферных процессов становится иллюзорной, поскольку невозможно получить оценки для всех параметров, входящих в необозримое множество уравнений, провести верификацию модели и, тем более, выделить ключевые факторы динамики. Кроме того, существующие распределенные модели биосферы демонстрируют плавную динамику изменений при увеличении концентрации парниковых газов в атмосфере. Однако наличие в системе множества обратных связей, большинство из которых — положительные, ставит под сомнение реалистичность плавных сценариев. Выделение и оценку значения механизмов, способных привести к катастрофическим изменениям на Земле, можно эффективно осуществить только на минимальных (обобщенных) моделях глобальной динамики, имеющих относительно небольшое число уравнений [1].

Предмет и методы исследования. Большинство существующих моделей биосферы создано для исследования глобального цикла углерода в биосфере. И это обосновано, поскольку, с одной стороны, углерод — неизменный компонент живого и неживого органического вещества биосферы и, следовательно, скорости его поглощения и выделения являются индикаторами экологических процессов. С другой стороны, углерод представлен в атмосфере как двуокись углерода, которая является основным компонентом, вызывающим парниковый эффект, и фактором, влияющим на климат планеты. Поэтому представляется разумным начать построение минимальных моделей биосферы с моделирования глобальных потоков углерода. Оценка параметров таких моделей можно выполнять на основе имеющихся данных о круговороте CO_2 в биосфере. Наличие достоверных интервалов у этих оценок естественно приводит к набору вариантов возможного сценария будущих глобальных изменений.

Следует заметить, что любые вычисленные сценарии биосферной динамики могут быть только вероятностными. Причина заключается в том, что оценки почти всех параметров биосферы и климата имеют приближенный характер. Так, например, оценки количества углерода в атмосфере варьируют от 600 до 760 Гт, в биомассе — от 500 до 850 Гт, в почве — от 1080 до 2000 Гт; первичная продукция фотосинтеза варьирует в диапазоне от 110 до 120 ГтС/г [2]. Наиболее вероятное значение одного из важнейших параметров системы биосфера—климат, а именно чувствительности

климата, характеризующего повышение глобальной температуры при удвоении атмосферной концентрации CO_2 , равно $4,5^\circ\text{C}$ [3]. Однако по некоторым оценкам этот параметр может достигать 11°C [4].

Обычно модели климата и биосферы создают для вычисления наиболее вероятного сценария, что вынуждает разработчиков моделей учитывать максимально возможное число факторов и строить большие распределенные модели климата и биосферы. Однако следует заметить, что знание наиболее вероятного сценария развития биосферы не может повлиять на принятие практических решений, поскольку при этом необходимо еще знать доверительные интервалы для всех возможных траекторий с высочайшим уровнем статистической надежности (значимости).

Так, например, согласно грубым оценкам вероятность авиакатастрофы не превышает 10^{-4} , «цена» катастрофы — приблизительно 100 человек. При этом люди согласны летать. Считая равноценными человеческие жизни и вводя принцип обратной пропорциональности допустимого риска числу подверженных риску, можно составить простую пропорцию для вычисления уровня надежности оценок биосферной катастрофы, которая не должна превышать 10^{-11} за обозримое время существования человечества.

Эти оценки свидетельствуют о том, что для практических нужд требуется не вычисление наиболее вероятного сценария, а оценка условий и параметров, при которых, хотя бы с малой вероятностью, но возможно осуществление наихудшего сценария. Такой сценарий возможен, когда реальные значения параметров модели находятся в неблагоприятных точках на концах доверительных интервалов, а действие потенциальных компенсаторных механизмов равно минимально возможному.

Такое видоизменение конечной цели биосферного моделирования сформулировано в виде «принципа наихудшего сценария» [5], который заключается в выборе и изучении только тех процессов, которые могут максимально быстро привести к негативным изменениям биосферы, и взвешенном игнорировании возможных компенсаторных механизмов. Наихудшим сценарием является катастрофический пороговый вариант глобальных изменений, когда до определенного порога постепенные изменения являются обратимыми, но при переходе этого порога в системе биосфера—климат запускаются лавиноподобные и необратимые изменения глобальных параметров. В рассматриваемом случае термин «катастрофический» больше соответствует термину, принятому в теории катастроф, чем обычному значению, когда любой серьезный природный катаклизм воспринимается как катастрофа.

Согласно изложенному наибольшее практическое значение имеет знание наиболее неблагоприятного, но возможного при данных доверитель-

ных интервалах сценария. Однако вследствие существенной нелинейности модели наилучшее сочетание ее параметров может оказаться контринтуитивным. Поэтому цель исследования — прямой расчет и визуализация сценариев развития биосферы при различных сочетаниях параметров и выбор наилучшего из них.

Обобщенная (включающая сушу и океан) минимальная модель биосферы подверглась упрощению по сравнению с вариантом, опубликованным в работе [5]. Из рассмотрения исключен блок океанической биоты, влиянием которой на развитие катастрофического биосферного режима, как показали модельные эксперименты, можно пренебречь.

Система уравнений модели имеет следующий вид:

$$\frac{dA}{dt} = S(y, T(A)) + C_{a_up} BM_{out}(A) - P(x, A, T(A)) - C_{a_down} AM_{in}(A) + fuel(t), \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = P(x, A, T(A)) - D(x), \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T(A)), \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dt} = [C_{a_down} AM_{in}(A) + C_{d_up} U] - [C_{f_down} B + C_{a_up} BM_{out}(A)], \quad (4)$$

$$\frac{dU}{dt} = C_{f_down} B - C_{d_up} U. \quad (5)$$

Уравнение (1) описывает изменения количества углерода в земной атмосфере, уравнение (2) — изменения количества углерода в биомассе живых растений, уравнение (3) — динамику органических остатков, уравнения (4) и (5) — динамику углерода в фотическом слое океана и в его глубинных слоях.

Предположения, принятые при построении модели, такие же, как в работе [5]. Опишем вид функций, использованных в уравнениях.

Функция скорости роста растительной биомассы (ГтС/г) имеет вид

$$P(x, A, T) = V_p x (x_{max} + x) V(A) f_p(T(A)),$$

где x — количество углерода в биомассе растительного компартамента, ГтС; A — атмосферный углерод, ГтС; T — среднегодовая глобальная приповерхностная температура; V_p — масштабный фактор, $1/(\text{ГтС} \cdot \text{г} \cdot \text{град}^2)$; $f_p(T)$ — температурная зависимость прироста биомассы растений; x_{max} — предельное количество биомассы, зависящее от предельно допустимой плотности растительного покрытия (ГтС) в модели принимается $x_0 G$, где x_0 —

количество углерода в наземной биомассе растений в настоящее время; G — коэффициент, характеризующий возможность увеличения количества биомассы растений.

Функция скорости роста биомассы относительно количества углерода в атмосфере (в форме CO_2) имеет вид известной функции Моно:

$$V(A) = \frac{A}{K_A + A}.$$

В уравнение Моно обычно включены концентрации веществ, участвующих в реакции, но поскольку объем реакционного пространства (атмосфера) остается неизменным, в модели используется общее количество атмосферного углерода как единицы для того, чтобы упростить подбор данных. Параметр K_A выбран равным 900 ГтС на основе экспериментальных данных, описанных в работе [6].

Эмпирическая зависимость скорости роста растительной биомассы от температуры T и максимальной температуры T_{\max} имеет следующий вид:

$$f(T, T_{\max}) = T^d (T_{\max} - T), \quad (6)$$

где $d = 1,5$ и $0 \leq T \leq T_{\max}$. Эмпирическая зависимость скорости возрастания среднегодовой глобально приповерхностной температуры от количества углерода в атмосфере (в форме CO_2) имеет вид [7]:

$$T(A) = T_0 + T_{del} \log_2 \left(\frac{A}{A_0} \right),$$

где A — текущее количество углерода в атмосфере; A_0 — количество углерода в атмосфере в момент измерения среднегодовой приповерхностной температуры в T_0 , в настоящее время равна $15,5$ °С; T_{del} — чувствительность климата.

Скорость отмирания биомассы (ГтС/Г) запишем в виде

$$D(x) = V_d x,$$

где V_d — масштабный фактор; x — количество углерода (Гт) в биомассе.

Скорость почвенного дыхания (разложение мертвой органики) и выделения CO_2 в атмосферу описывается функцией

$$S(y, T) = V_S y f_M(T),$$

где V_S — масштабный фактор; y — количество углерода в мертвой биомассе, Гт; $f_M(T)$ — функция типа (6), описывающая температурную зависимость почвенного дыхания, но при больших значениях максимальной температуры.

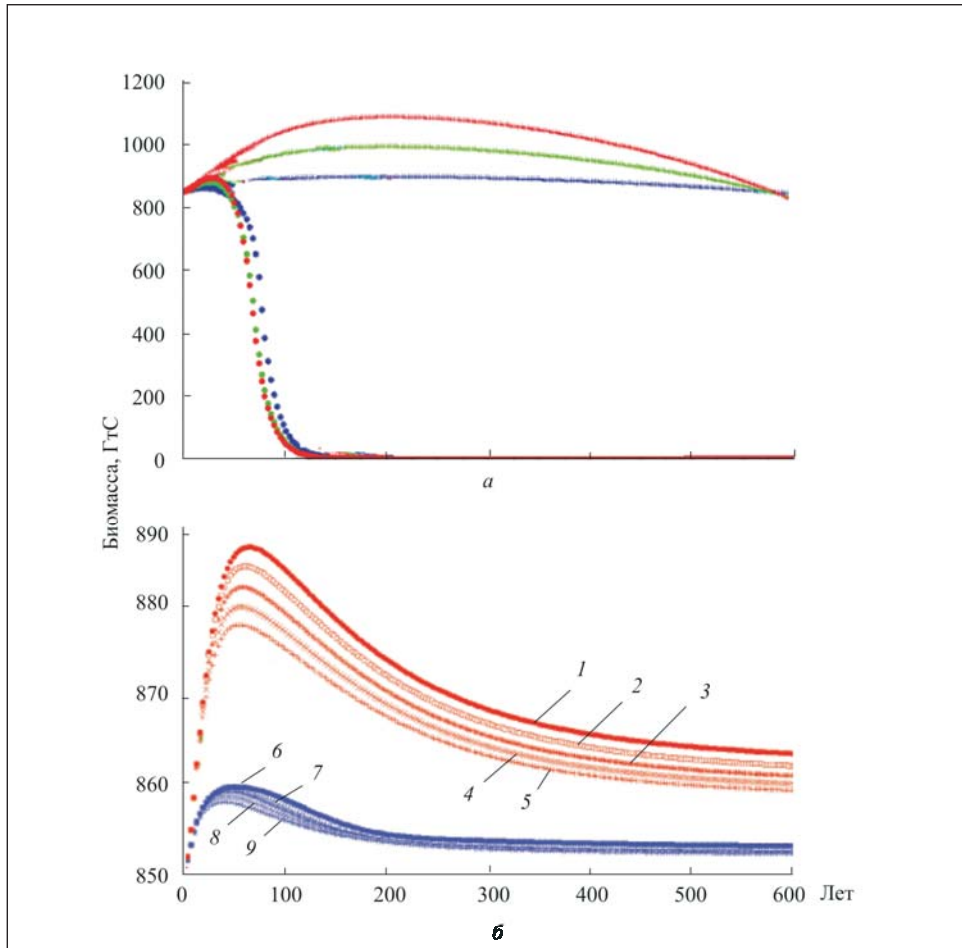


Рис. 1. Семейство траекторий количества углерода в биомассе в обобщенной (суша-океан) модели при линейном росте темпов сжигания углеродсодержащих топлив (а) и в биосферной модели при гиперболическом (двукратном за первые 10 лет) уменьшении сжигания ископаемых топлив (б) для различных значений T_{del} и G : а — ... $T_{del} = 6$ °С; — $T_{del} = 2$ °С; б — кривые 1—5 — $G = 2$; кривые 6—9 — $G = 1,2$; 1 — $T_{del} = 6$ °С, 2 — $T_{del} = 5$ °С, 3 — $T_{del} = 4$ °С, 4 — $T_{del} = 3$ °С, 5 — $T_{del} = 2$ °С

В соответствии с данной задачей в качестве функции $fuel(t)$ выбрана линейная зависимость, соответствующая сценарию А2 выброса парниковых газов [3] с соответствующими значениями параметров.

В уравнениях (1), (4) слагаемое $C_{a_down}AM_{in}(A)$ соответствует поглощению углекислого газа поверхностным слоем океана, а слагаемое $C_{a_up}BM_{out}(A)$ — эмиссии углекислого газа с поверхности океана в ат-

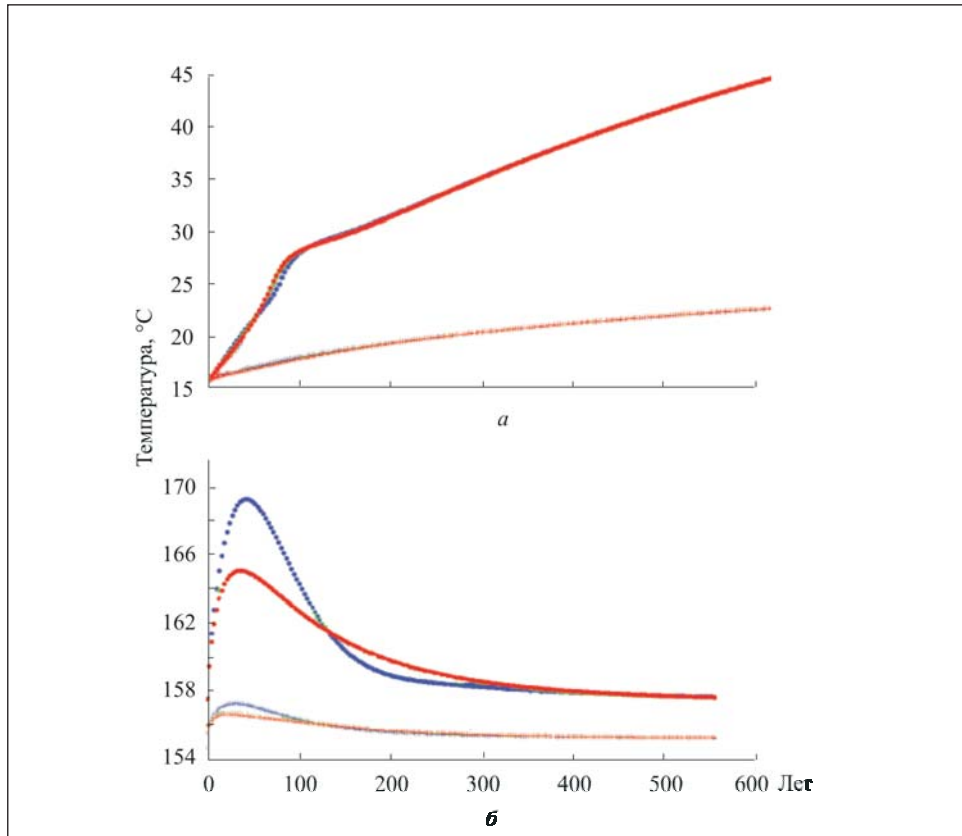


Рис. 2. Семейство траекторий приповерхностной среднегодовой температуры в биосферной модели при линейном возрастании темпов сжигания углеродсодержащих топлив (а) и гиперболическом (двукратном за первые 10 лет) уменьшении сжигания ископаемых топлив (б) для различных значений T_{del} и G : $\dots - T_{del} = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$; $— - T_{del} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$

мосферу. Переменные коэффициенты $M_{in}(A) = e^{-0,03[T(A)-T_0]}$ и $M_{out}(A) = e^{0,03[T(A)-T_0]}$ характеризуют физическое явление — уменьшение растворимости газа в жидкости при повышении температуры. Эти коэффициенты получены простой эмпирической аппроксимацией данных по концентрации CO_2 в воде при различной температуре [2]. В уравнении (5) слагаемое $C_{d_up}U$ соответствует апвеллингу, а $C_{f_down}B$ — даунвеллингу.

Результаты моделирования имеют в некоторой степени иллюстративный характер для представления свойств системы на больших отрезках времени. Например, продление времени сжигания ископаемых топлив и, тем более, распространение столетнего сценария A2 [3] на 600 лет, естественно, не является корректным относительно запасов ископаемых топлив.

Это сделано только для получения общей картины динамики системы. Для удобства визуализации влияния изменений (ошибочных оценок) параметров биосферной модели на ее динамику на рис. 1 и 2 показаны семейства траекторий при одновременном изменении параметров модели T_{del} и G .

На рис. 1 видно, что траектории динамики биомассы (как и траектории других существенных переменных) группируются в своеобразные пучки, соответствующие конкретному значению T_{del} . При этом чем больше значение T_{del} , тем ближе нисходящий участок пучка к началу координат. Внутри пучка каждая ветвь соответствует определенному значению G : на нисходящем участке ветвь, соответствующая большему значению G , располагается ближе к началу координат.

Следует заметить, что на восходящих участках всех траекторий большее значение G соответствует более благоприятному состоянию биосферной динамики, а именно увеличивается биомасса, что приводит к меньшей концентрации CO_2 в атмосфере, а значит, и меньшему потеплению климата. На нисходящих участках траекторий именно большие значения G соответствуют более неблагоприятному состоянию биосферной динамики, так как соответствуют большей скорости гибели биоты.

Динамика приповерхностной среднегодовой глобальной температуры (рис. 2, а) на начальном участке (до 200 лет) во многом определяется механизмом положительной обратной связи, обеспечивающим ускорение выделения углерода из органики почв и отмирание биоты, что соответствует большему наклону траекторий на этом участке. Дальнейшее повышение температуры обусловлено сжиганием ископаемых топлив. Как видим, положительная обратная связь оказывает существенное влияние при $T_{del} = 6$ °С.

С помощью данной модели можно определить, какие меры по прекращению сжигания ископаемых топлив будут достаточны для предотвращения катастрофических режимов. На рис. 1, б и 2, б показана динамика биоты и температуры в случае, когда, начиная с настоящего времени, сжигание топлив уменьшается по гиперболическому закону, причем двукратное уменьшение выбросов CO_2 достигается уже в первые 10 лет.

С помощью модели были получены также результаты, не представленные на рисунках. Влияние изменения количества углерода в мертвой органике наиболее существенно при ограниченных длительностях эмиссии углерода в атмосферу. Временной порог запуска катастрофических процессов (дата необратимости) практически не зависит от количества углерода в органике, но тяжесть последствий (максимальная температура, степень разрушения биоты) возрастает с увеличением количества углерода. Изменение количества углерода в биомассе приводит к несущественному изменению тяжести последствий, но оказывает влияние на дли-

тельность переходных процессов, которая уменьшается с уменьшением количества углерода в биомассе.

Кроме того, вследствие наличия нелинейностей компонентов биосферной модели и инерционности океана (системы фотический слой — глубинные слои) после прекращения антропогенного воздействия возможно уменьшение количества углерода в атмосфере, а значит, и снижение температуры до значений, меньших, чем это было перед началом катастрофического процесса. Следовательно, глобальное потепление, вызванное антропогенными выбросами двуокиси углерода, может смениться глобальным похолоданием, если эмиссия углерода прекратится слишком резко.

Выводы. Согласно результатам моделирования способность растений (преимущественно древесных) поглощать двуокись углерода и, как принято считать, частично устранять избыточность антропогенного производства CO_2 , с точки зрения развития катастрофических процессов не является однозначной. Так, при относительно малой длительности (дозе) антропогенных выбросов поглощающая способность растений действительно приводит к уменьшению потепления и играет компенсирующую роль.

Однако если возрастание концентрации CO_2 в атмосфере продолжается, то углерод, накопленный в растениях и перешедший затем в мертвую органику, начинает выходить в атмосферу, увеличивая скорость по мере возрастания температуры. При этом океан не успевает компенсировать такой поток углерода, так как при повышении температуры поглотительная способность океана уменьшается. Даже беспрецедентные меры по двукратному сокращению сжигания ископаемых топлив за 10 лет не могут обеспечить предотвращение глобальной катастрофы с требуемой надежностью.

На основании полученных результатов моделирования возможных катастрофических исходов Киотский протокол и планируемые меры по сокращению выбросов парниковых газов представляются недостаточными.

Современный уровень жизни в развитых странах связан с потреблением и химической переработкой большого числа материалов и веществ, добываемых из биосферы и возвращаемых в нее в существенно измененном виде. Это перестраивает и изменяет биосферные химические циклы, а часто вообще разрывает их, что приводит к нарушению замкнутости биосферных химических процессов. Рассмотренные в предлагаемой модели сценарии развития биосферы при различных скоростях выбросов CO_2 описывают различные степени нарушения замкнутости земной биосферы по углероду. Таким образом, можно утверждать, что принцип замкнутости должен быть основой всех критериев экологичности и устойчивого развития.

The influence of variation of minimal biosphere model parameters on its dynamics is considered in this work. It is shown that the ability of forests to accumulate carbon in biomass causing some decreasing of global warming now increases the risk of starting irreversible catastrophic changes in the future.

1. *Watson A. J., Lovelock J. E.* Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld // *Tellus*. — 1983. — Vol. 35b. — P. 284—289.
2. *Кондратьев К. Я., Крапивин В. Ф.* Моделирование глобального круговорота углерода. — М. : Физматлит, 2004. — 336 с.
3. *IPCC*, 2007. — www.ipcc.ch.
4. *Stainforth D. A., Aina T., Christensen C. et al.* Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases // *Nature*. — 2005. — № 433. — P. 403—406.
5. *Bartsev S. I., Degermendzhi A. G., Erokhin D. V.* Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics // *Ecological modeling*. — 2008. — P. 160—171.
6. *Pritchard S. G., Davis M. A., Mitchell R. J. et al.* Root dynamics in an artificially constructed regenerating longleaf pine ecosystem are affected by atmospheric CO₂ enrichment // *Environmental and Experimental Botany*. — 2001. — Vol. 46. — P. 35—69.
7. *Gifford R. M.* Implications of CO₂ effects on vegetation for the global carbon budget // *The Global Carbon Cycle*. Ed. Heimann M.— Berlin: Springer-Verlag. — 1993. — P. 159—199.

Поступила 11.08.10;
после доработки 27.09.10

БАРЦЕВ Сергей Игоревич, д-р физ.-мат. наук, зав. лабораторией теоретической биофизики Ин-та биофизики СО РАН. В 1977 г. окончил Красноярский госуниверситет. Область научных исследований — математическое моделирование сложных систем, нейросетевые алгоритмы, системы жизнеобеспечения.

ЩЕМЕЛЬ Антон Леонидович, канд. физ.-мат. наук, вед. инженер лаборатории биофизики водных экосистем Ин-та биофизики СО РАН. В 1999 г. окончил Красноярский госуниверситет. Область научных исследований — математическое моделирование сложных систем, нейросетевые алгоритмы, статистика.

ИВАНОВА Юлия Дмитриевна, канд. техн. наук, науч. сотр. лаборатории теоретической биофизики Ин-та биофизики СО РАН. В 1990 г. окончила Красноярский госуниверситет. Область научных исследований — математическое моделирование сложных систем, статистика, экология.