

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА ИНДИКАТОРА ВЫЖИВАНИЯ СИСТЕМЫ КЛИМАТ-ПРИРОДА-ОБЩЕСТВО

д-р физ.-мат. наук, проф В.Ф.Крапивин.

(Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН)

канд. физ.-мат. наук В.Ю. Солдатов

(Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН)

канд. техн. наук И.И. Потапов

(Всероссийский институт научной и технической информации,
(ipotapov37@mail.ru))

Проблема биосложности в глобальной системе климат-природа-общество рассматривается с позиции теории сложных иерархических систем. Иерархия пространственных и временных масштабов моделируется в терминах количества информации, разнообразия элементов, динамической устойчивости биогеохимических циклов и отношений между множествами элементов. Строится имитационно-методическая модель динамики биосложности, основанная на корреляциях между базовыми элементами глобальной системы климат-природа-общество. Учитываются механизмы регуляции жизненных процессов и наличие ограничений по качеству окружающей среды. Формулируются основные положения глобальной модели и дается анализ ее информационной базы. Анализируется взаимосвязь между критериями биосложности, устойчивости и живучести.

Ключевые слова: биосложность, индикатор, живучесть, климат, природа, общество, модель.

ALGORITHMS FOR THE CALCULATION OF SURVIVABILITY INDICATOR FOR THE CLIMATE-NATURE-SOCIETY SYSTEM

V.F. Krapivin, V.Yu. Soldatov, I.I. Potapov

Biocomplexity problem in the global climate-nature-society system is considered within the framework of a complex theory of hierarchical systems. Hierarchy of spatial and temporal scales are modelled in terms of information type and magnitude, diversity of the elements, dynamic stability of biogeochemical cycles and relationships between the space of the elements. A simulation-methodic model of biocomplexity is synthesized based on correlations between the basic elements of the climate-nature-society system. The regulation mechanisms of living processes are taken into account and environmental quality regulations or restrictions include also. Ba-

sic principles of global model are formulated and its information basis is analyzed. The interconnection between the criteria of biocomplexity, stability and survivability is analyzed.

Keywords: biocomplexity, indicator, survivability, climate, society, model.

Введение

Проблема взаимодействия различных элементов и процессов в глобальной системе климат-природа-общество (СКПО) в последние годы привлекает внимание многих исследователей [1-21]. Попытки оценить и предсказать динамику этого взаимодействия делают ученые различных научных направлений. Одной из таких попыток является объявленная в США Национальным научным Фондом Программа «Biocomplexity», в рамках которой за период с 2001г. планируется изучить и понять взаимосвязь между сложностью биологических, физических и социальных систем и тенденциями в изменениях современной окружающей среды. В рамках этой программы под сложностью системы, так или иначе взаимодействующей с окружающей средой, понимается явление, возникающее при контакте живой системы с окружающей ее средой в условиях Земного шара.

Биосложность является производной биологических, физических, химических, социальных и поведенческих взаимодействий подсистем окружающей среды, включая живые организмы и население Земного шара. По существу понятие биосложности в окружающем нас мире тесно связано с «закономерностями функционирования биосферы как единства образующих ее экосистем и природно-хозяйственных систем различного масштаба, от локального до глобального» [4,6,9]. Поэтому для определения биосложности и ее оценки необходимо совместное формализованное описание биологических, геохимических, геофизических и антропогенных факторов и процессов, происходящих на данном уровне пространственно-временной иерархии шкал и масштабов.

Проявление биосложности является характерным признаком всех систем окружающей среды, связанных с жизнью. Элементы этого проявления изучаются в рамках теории устойчивости и живучести экосистем [8,10]. Здесь следует отметить, что формирование биосложности включает показатели степени взаимной модификации взаимодействующих систем, а это значит, что изучение биосложности необходимо вести с учетом как пространственных, так и биологических уровней организации. Сложность этой задачи определяется сложностью поведения объекта исследования, особенно, если учитывать человеческий фактор, из-за которого количество стрессовых ситуаций в окружающей среде постоянно возрастает.

Человечество накопило много знаний о системах окружающей среды. Использование этих знаний для изучения биосложности возможно в рамках синтеза глобальной модели, отражающей закономерности взаимодействия элементов окружающей среды и позволяющей без ущерба ей осуществлять оценки «эффективности» реализации сценариев развития человеческого общества. Именно эта проблема лежит в основе всех вопросов, поставленных упомянутой программой «Biocomplexity».

Здесь делается попытка формализовать понятие биосложности и предлагается технология ее изучения.

Индикатор биосложности

Исследования процессов взаимодействия человека и природы как правило нацелены на попытку понять и оценить последствия этого взаимодействия. Достоверность и точность таких оценок зависит от критериев, которые берутся за основу при выводах, экспертизах и рекомендациях. В настоящее время нет единой методики выбора таких критериев, так как отсутствует единый научно-обоснованный подход к экологическому нормированию хозяйственных воздействий на природную среду. Ведь от выбора таких критериев зависит точность экологической экспертизы действующих и планируемых производств, а также репрезентативность данных глобального геоинформационного мониторинга [11,16].

Происходящие в окружающей среде процессы можно представить как совокупность взаимодействий между ее подсистемами. Ведь человек является одним из ее элементов, а следовательно однозначного расчленения окружающей среды, например, на биосферу и общество выполнить невозможно. Все на Земле коррелировано и взаимосвязано. Вопрос состоит в том, чтобы найти такие механизмы описания этих корреляций и взаимозависимостей, которые бы достоверно отражали динамические тенденции в окружающей среде и давали ответы на вопросы, сформулированные в программе «Bioscomplexity»:

1. Каким образом сложность среди биологических, физических и социальных систем внутри окружающей среды возникает и изменяется?
2. Каковы механизмы спонтанного развития многих явлений в окружающей среде?
3. Каким образом системы окружающей среды с живыми компонентами, включая и те, которые созданы человеком, реагируют и приспосабливаются к стрессовым ситуациям?
4. Какими путями информация, энергия и вещество движутся внутри систем окружающей среды и через их уровни организации?
5. Возможно ли предсказать адаптируемость системы и прогнозно оценить изменения в ней?
6. Как человечество влияет и реагирует на биосложность в природных системах?

К этому ряду можно добавить еще многие вопросы не менее важного и значимого характера. Например, до какого уровня сложности и множественности необходимо довести спутниковые системы наблюдения за окружающей средой, чтобы даваемой ими информации было бы достаточно для достоверной оценки ее состояния, хотя бы на момент получения этой информации? Также важен вопрос об оптимальности размещения средств геоинформационного мониторинга на различных уровнях уже сложившейся его организации.

Биосложность окружающей среды в какой-то степени является характеристикой (уровнем) взаимосвязанности ее подсистем. Другими словами, можно ввести шкалу Ξ биосложности, изменяющуюся от позиции, когда в окружающей среде все взаимодействия прекращены (оборваны), до уровня, когда они соответствуют естественному процессу эволюции. В этом случае мы получаем интегральный показатель состояния окружающей среды в целом, включая биологическую способность (bioavailability), биологическое разнообразие (biodiversity) и выживаемость (survivability). Этот показатель отражает уровень всех видов взаимодействия элементов окружающей среды. При биологическом взаимодействии, связанном с отношениями типа «хищ-

ник-жертва» и «конкуренция за энергетический ресурс», существует некоторый минимальный уровень концентрации пищи, когда она становится практически недоступной и взаимодействие консумента с продуцентом прекращается. Химический и физический характеры взаимодействия элементов окружающей среды также зависят от наборов критических параметров.

Все сказанное подчеркивает, что биосложность относится к категориям, которые трудно измерить эмпирически и выразить количественно. Однако попытаемся перейти от чисто словесных тавтологических рассуждений к формализованному количественному определению. Для перехода к градициям шкалы Ξ с числовым масштабом постулируем, что между двумя значениями индикатора шкалы существуют отношения типа $\Xi_1 < \Xi_2$, $\Xi_1 > \Xi_2$ или $\Xi_1 \equiv \Xi_2$. Другими словами, всегда существует такое значение этой шкалы ρ , которое определяет уровень биосложности $\Xi \rightarrow \rho = f(\Xi)$, где f - некоторое преобразование понятия биосложности в число.

Попытаемся найти удовлетворительную модель, которая отобразит словесный портрет биосложности в область понятий и признаков, подчиняющихся формализованному описанию и преобразованию. С этой целью выделим в СКПО m элементов - подсистем низшего уровня, взаимодействие между которыми определим бинарной матричной функцией: $A = \| a_{ij} \|$, где $a_{ij} = 0$, если элементы i и j не взаимодействуют; $a_{ij} \neq 0$, если элементы i и j находятся во взаимодействии. Тогда любая точка $\xi \in \Xi$ определяется как сумма

$$\xi = \sum_{i=1}^m \sum_{j>i}^m a_{ij},$$

где величина параметра a_{ij} характеризует уровень взаимодействия.

Здесь, безусловно, возникает неоднозначность, для преодоления которой необходимо шкалу Ξ усложнить за счет, например, введения весовых коэффициентов для всех элементов СКПО. Характер этих коэффициентов зависит от природы элементов. Поэтому выделим в СКПО три основных типа элементов: живые, растительность и неживые элементы. Живые элементы характеризуются плотностью, исчисляемой в количестве особей на (в) единице площади (объема) или концентрацией биомассы. Растительность характеризуется типом и долей занимаемой площади. Неживые элементы разделяются по уровню их концентраций, соотношенных к площади или объему пространства. В общем случае каждому элементу i приписывается некоторая характеристика k_i , которая соответствует его значимости. В результате получаем уточнение для расчетной формулы при переходе от понятия биосложности к шкале Ξ ее индикатора:

$$\xi = \sum_{i=1}^m \sum_{j>i}^m k_j a_{ij}.$$

Ясно, что $\xi = \xi(\varphi, \lambda, t)$, где φ и λ - географические широта и долгота соответственно, t - текущее время. Для некоторой территории Ω индикатор биосложности определим как среднее значение

$$\xi_{\Omega}(t) = (1/\sigma) \int_{(\varphi, \lambda) \in \Omega} \xi(\varphi, \lambda, t) d\varphi d\lambda,$$

где σ - площадь территории Ω .

Таким образом, индикатор $\xi_{\Omega}(t)$ выступает как интегральный показатель сложности СКПО, отражая индивидуальность ее структуры и поведения в каждый момент времени t в пространстве Ω . В соответствии с законами естественной эволюции уменьшение (увеличение) величина ξ_{Ω} будет отслеживать возрастание (сокращение) биоразнообразия и способности природно-антропогенных систем к выживанию. Так как уменьшение биоразнообразия нарушает замкнутость биогеохимических круговоротов и приводит к увеличению нагрузки на невозобновимые ресурсы, то структура матрицы A смещается в направлении усиления позиций ресурсоисточающих технологий, и вектор энергетического обмена между подсистемами СКПО смещается в состояние, когда уровень ее выживаемости понижается.

Модель биосложности СКПО

Система климат-природа-общество состоит из элементов – подсистем V_i ($i=1, \dots, m$), взаимодействие между которыми формируется во времени в зависимости от многих факторов. Биосложность СКПО складывается из структурной и динамической сложности составляющих ее элементов. Другими словами, биосложность СКПО формируется в процессе взаимодействия ее частей $\{V_i\}$. С течением времени подсистемы V_i могут изменять свои состояния и, следовательно, будет изменяться топология связей между ними. Эволюционный механизм приспособления подсистем V_i к окружающей их среде позволяет выдвинуть гипотезу о том, что каждая подсистема V_i , независимо от ее типа, обладает структурой $V_{i,S}$, поведением $V_{i,B}$ и целью $V_{i,G}$. Так что $V_i = \{V_{i,S}, V_{i,B}, V_{i,G}\}$. Целью $V_{i,G}$ подсистемы V_i является ее стремление достигнуть определенных предпочтительных для нее состояний. Целесообразность структуры $V_{i,S}$ и целенаправленность поведения $V_{i,B}$ подсистемы V_i оценивается эффективностью достижения цели $V_{i,G}$.

В качестве примера приведем процесс миграции элементов nekтона. Рыбы мигрируют в направлении максимального градиента пищевого рациона с учетом возможных ограничений на параметры водной среды (температура, соленость, концентрация кислорода, загрязненность и т.п.). Значит элементы nekтона имеют цель $V_{i,G}$ увеличить свой рацион, а их поведение $V_{i,B}$ состоит в расчете траектории смещения, обеспечивающей достижение этой цели. Известны также структурные изменения в процессе образования стай, которые для каждого вида элементов nekтона можно представлять в терминах $V_{i,S}$.

Поскольку взаимодействие подсистем $\{V_i\}$ связано с химическим и энергетическим кругооборотом, то естественно предположить, что каждая подсистема V_i так организует геохимические и геофизические преобразования вещества и энергии, чтобы сохранить устойчивое состояние. Формализованный подход к этому процессу состоит в предположении, что в структуре СКПО между подсистемами V_i происходят обмены некоторыми количествами V расходуемых ресурсов на некоторые количества W потребляемых ресурсов. Назовем этот процесс (V, W) - обменом. Целью подсистемы V_i является наиболее выгодный (V, W) - обмен, т.е. за минимальное количество V получить возможно большее количество W , которое является функцией структур и поведений взаимодействующих подсистем: $W = W(V, B_i, \{B_k, k \in K\})$, где K - множество номеров подсистем.

тем, находящихся в контакте с подсистемой B_i . Обозначим $B_K = \{B_k, k \in K\}$. Тогда результатом взаимодействия подсистемы B_i с ее окружением B_K являются следующие (V, W) - обмены:

$$W_{i,0} = \max_{B_i} \min_{B_K} W_i(V_i, B_i, B_K) = W_i(V_i, B_{i,opt}, B_{K,opt});$$

$$W_{K,0} = \max_{B_K} \min_{B_i} W_K(V_K, B_i, B_K) = W_K(V_K, B_{i,opt}, B_{K,opt})$$

Отсюда видно, что имеется некоторое размывание цели подсистемы B_i при определении уровней V_i и V_K . Поскольку в природе действуют факторы лимитирования, то в данном случае естественно предположить наличие некоторого порога $V_{i,min}$, при достижении которого энергетический ресурс подсистемы перестает тратиться на добывание внешнего ресурса, т.е. при $V_i \leq V_{i,min}$ подсистема B_i переходит в режим регенерации внутреннего ресурса. Другими словами, при $V_i \leq V_{i,min}$ происходит уменьшение индикатора биосложности $\xi_{\Omega}(t)$ за счет обрыва связей подсистемы B_i с другими подсистемами. В общем случае V_{min} является структурной функцией ступенчатого типа, т.е. переход a_{ij} из состояния $a_{ij} \neq 0$ в состояние $a_{ij} = 0$ не для всех j происходит одновременно. В самом деле, в любой трофической пирамиде отношения «хищник-жертва» прекращаются при уменьшении концентрации жертвы ниже некоторого критического уровня. В других случаях взаимодействие подсистем $\{B_i\}$ между собой может прекращаться в зависимости от различных сочетаний их параметров. Формализованное описание возможных ситуаций взаимодействия подсистем $\{B_i\}$ осуществим в рамках имитационной модели функционирования СКПО [6-8].

Моделирование СКПО

Возможны два подхода к формализованному описанию функционирования системы климат-природа-общество. Первый подход основан на технологии эволюционного моделирования [10] и состоит в представлении каждой подсистемы B_i в виде кибернетического графа, вершины которого соответствуют множеству ее состояний. Применение этого подхода требует детальной инвентаризации элементов СКПО и их функционального описания в терминах теории автоматов. Фактически строится граф с двумя уровнями организации - глобальным и подсистемным. На глобальном уровне вершины графа соответствуют подсистемам $\{B_i\}$, а на подсистемном уровне вершины локального графа отражают состояния подсистем $\{B_i\}$. Связи в графе глобального уровня описываются процессом (V, W) -обмена между B_i и B_K , а на подсистемном уровне они отвечают за переходы B_i между ее возможными состояниями. В принципе цепочка выделения подуровней в глобальном графе может продолжаться бесконечно с выделением все более и более частных подсистем.

Процесс синтеза модели СКПО эволюционного типа базируется на ее предьстории, в качестве которой могут быть выбраны ряды состояний некоторых или всех ее подсистем. Фактически он состоит из двух этапов- мутации и оценки качества. Этот процесс реализуется на глобальном уровне, начиная с некоторого априорного проекта модели СКПО в виде B^k . Переход к новому варианту модели B^{k+1} осуществляется изменениями структуры

V_5 и поведения V_6 . Эффективность этого перехода оценивается функционалом $S(B^{k+1})$, характеризующим качество B^{k+1} , например, по ее отклонению от предыстории. Структура модели B^k задается графом $\mathfrak{Z}=(X, \Phi)$, где $X=\{B_1, \dots, B_m\}$, $\Phi=\{\Phi_{B_1}, \dots, \Phi_{B_m}\}$, Φ_{B_i} - множество вершин глобального графа, в которые отображается вершина-подсистема B_i . Одновременно строится граф модели $B_{i,k}$. Переход к новым реализациям моделей B^{k+1} и $\{B_{i,k}\}$ осуществляется путем добавления новых или устранения старых вершин, добавлением или удалением связей между вершинами. В этой процедуре возможны ограничения, отражающие тенденции и закономерности реального временного масштаба. Например, нет смысла рассматривать вариант замены одних земных покровов другими на отрезках времени в несколько лет, или замены водной поверхности на сушу и т.п. Другими словами, из спектра возможных состояний и связей исключаются бессмысленные и нереальные решения.

Другой более распространенный и развитый подход к моделированию СКПО состоит в синтезе комплекса математических описаний частных процессов взаимодействия между подсистемами $\{B_i\}$. Для этого в СКПО необходимо выделить репрезентативные уровни детализации ее структуры, а затем на математическом языке описать связи между ними. Выделим в СКПО такие уровни: B_1 - население до 16 лет, B_2 - население от 16 до 60 лет, B_3 - население старше 60 лет, B_4 - инвалиды, B_5 - дикие животные, B_6 - домашние животные, B_7 - B_{26} - различные типы почвенно-растительных формаций по [13,16], B_{27} - минеральные ресурсы, B_{28} - гумус почв, B_{29} - соединения азота, B_{30} - углекислый газ, B_{31} - кислород, B_{32} - B_{34} - вода в жидком, замёрзшем и паробразном состояниях; B_{35} - фитопланктон, B_{36} - бактериопланктон, B_{37} - зоопланктон, B_{38} - нектон, B_{39} - мертвое органическое вещество, B_{40} - соединения фосфора, B_{41} - соединения серы, B_{42} - метан, B_{43} - капитал, B_{44} - тяжелые металлы, B_{45} - углеводороды нефти, B_{46} - радионуклиды, B_{47} - другие загрязняющие вещества.

С учетом изученных процессов трансформации вещества и энергии в структурах СКПО B_i ($i=1, \dots, 47$) записываются балансовые уравнения типа:

$$\begin{aligned} \partial B_i / \partial t + \theta_\varphi \partial B_i / \partial \varphi + \theta_\lambda \partial B_i / \partial \lambda + \theta_\xi \partial B_i / \partial \xi = \sum_{i+} - \sum_{i-} + \\ + k_\varphi \partial^2 B_i / \partial \varphi^2 + k_\lambda \partial^2 B_i / \partial \lambda^2 + k_\xi \partial^2 B_i / \partial \xi^2, \end{aligned}$$

где (φ, λ, ξ) - пространственные координаты, \sum_{i+} и \sum_{i-} - приходная и расходная части баланса элемента B_i , $(\theta_\varphi, \theta_\lambda, \theta_\xi)$ и $(k_\varphi, k_\lambda, k_\xi)$ - показатели скоростей движения и перемешивания элементов внутри подсистемы B_i . Конкретизация этих составляющих осуществляется для каждой подсистемы индивидуально с учетом физических, биологических и химических процессов, которыми сопровождается реализация структурных, целевых и поведенческих изменений. Безусловно, здесь должны использоваться базы знаний конкретных наук, ответственных за изучение характеристик B_i . В этом случае описание (V, W) -обмена подменяется совокупностью математических описаний соотношений, характеризующих интенсивность и структуру связей элемента B_i с другими элементами с учетом дискретизации пространства и времени.

Например, связь типа «хищник-жертва» характерна для взаимоотношений между элементами B_{37} и B_{36} , B_{38} и B_{37} , B_i ($i=1-4$) и B_5 , B_6 и т.д. Такая связь хорошо описывается моделью:

$$\Sigma_{i+} = k B_i \left[1 - \exp \left(- \sum_{j \in S_i} k_{ij} \bar{B}_{ji} \right) \right], \quad \Sigma_{i-} = \sum_{j \in \Gamma_i} C_{ij} \Sigma_{j+}, \quad C_{ij} = k_{ji} \bar{B}_i / \sum_{m \in S_j} k_{jm} \bar{B}_m$$

где $\bar{B}_{ji} = \max \{ 0, B_j - B_{j,\min}(i) \}$, $B_{j,\min}(i)$ - минимальная биомасса j -го элемента, за пределами которой ее потребление i -м элементом прекращается; S_i - пищевой спектр i -го элемента, выступающего в роли хищника; Γ_i - спектр пищевой подчиненности B_i ;

Согласно этой модели при $B_j \leq B_{j,\min}(i)$ в матрице A элемент a_{ij} переключается из состояния « $\neq 0$ » в состояние « $= 0$ » (происходит обрыв энергетической связи в трофическом графе). Изменяется сложность СКПО. Аналогичные соотношения записываются для всех элементов $\{B_i\}$, включая и те, которые принадлежат к антропогенной составляющей. Ясно, что в результате получается довольно громоздкая система нелинейных уравнений, аналитический анализ которой невозможен. Хотя аналитические результаты исследования биосложности представляют несомненный интерес, в данном случае изучение динамики биосложности становится реальным только в рамках компьютерного эксперимента.

Заключение

Исследование сложности систем биологической сущности требует, как показано в данной статье, объединения усилий специалистов различных областей знания, способных синтезировать комплексную базу знаний, опираясь на которую можно создать модель для описания динамических процессов в окружающей среде. Точность исследования, безусловно, зависит от соотношения пространственных и временных масштабов, от уровня элементной детализации и от достоверности фрагментов опорной базы знаний. Несомненно, детальная информация об элементном составе взаимодействующих систем позволяет повысить надежность оценки выживания этих систем. Например, в [17] представлен комплекс исследований по применению методов статистической механики к анализу индикаторов биосложности, включая новые достижения в изучении фазовых переходов в биологических системах, эволюции, популяционной динамике, нейронных цепях и биологических осцилляторах. В работе [18] представлены многочисленные результаты взаимодействия растений с грибовыми образованиями, млекопитающими, бактериями, вирусами и насекомыми. Представляется целесообразным создание базы знаний о максимально детальном взаимодействии различных подсистем СКПО, чтобы на определенном уровне пространственной и предметной детализации оценивать показатель выживания человечества.

Литература (References)

1. *Casti J.* Connectivity, complexity, and catastrophe in large-scale systems. New York: Wiley, 1979, 216 pp.
2. *Fogel L.J., Owens A.J., Walsh M.J.* Artificial intelligence through simulated evolution. New York: Wiley, 1966, 230 pp.
3. *Forrester, J.W.* World dynamics. Cambridge: Allen Press, 1971, 167 pp.

4. Kelley J.J. and Krapivin V.F. Biocomplexity problem related to the Okhotsk Sea fisheries.// Int. Conference DAS, 27-29 June 2004, Suceava, Romania, pp. 52-57.
5. Kondratyev, K.Ya., Dontchenko, V.K. Ecodynamics and geopolitics. Vol.1: Global problems. Sankt-Petersburg: RFFI Press, 1999, 1038 pp.
6. Kondrat'yeu, K.Ya., Krapivin, V.F. Biocomplexity and global geographic information monitoring // Mapping Sciences and Remote Sensing, 2001, V.38, N.4, pp. 260-271.
7. Krapivin, V.F. Mathematical model for global ecological investigations// Ecological Modelling, 1993, V. 67, pp. 103-127.
8. Krapivin, V.F., Fleishman B.S. On the survivability of complex systems. Transactions of 15th Int. Congress on Cybernetics, Namur (Belgique), 1968, pp. 864-880.
9. Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A. Microwave radiometry technology for the nature-society system biocomplexity assessment (by the example of Okhotsk Sea). Proceedings of the 22th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, 18-23 February 2007, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp. 33-37.
10. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making. Springer, London, U.K., 2015. 903 pp.
11. Mkrtchyan F.A., Krapivin V.F. Microwave Radiometry Technology for the Nature-Society System Biocomplexity Assessment. Proceedings of the Urban Remote Sensing Joint Event (URBAN/URS_ - 2007 Symposium. Paris, France, 11-13 April, 2007, pp. 733-738.
12. Moiseien, N.N., Alexandrov V.V., Krapivin V.F., Lotov A.V., Svirzhev Yu.M., Tarko A.M.. Global modeling and climate impact analysis. IIASA Rept.,1983, A-2361, № CP-83-33, Laxenburg (Austria), pp. 1-50.
13. Moiseien, N.N., Svirzhev Yu.M., Krapivin V.F., Tarko A.M. Biosphere models. In: R.W. Kates et al. (Eds.). Climate Impact Assessment, New York: Wiley, 1985, pp.493-510.
14. Nitu C., Krapivin V.F., Bruno A.. System modeling in ecology. Bucharest: Printech, 2000, 260 pp.
15. Nitu C., Krapivin V.F., Bruno A. Intelligent technics in ecology. Bucharest: Printech, 2000, 150 pp.
16. Nitu C., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Information-Modeling Technology for Environmental Investigations. MATRIX ROM, Bucharest, Romania, 2013, 621 pp.
17. Reguera D., Vilar J.M.G., Rubi J.M. (Eds.) Statistical mechanics of biocomplexity. Proceedings of the XV Sitges Conference, 8-12 June 1998, Barcelona, Spain. Berlin: Springer-Verlag, 1999, 320 pp.
18. Southworth D. (Ed.) Biocomplexity of plant-fungal interactions. New York: Wiley-Blackwell, 2012, 232 pp.
19. Svirzhev, Yu.M., Krapivin V.F., Logofet D.O. Mathematical ecology: forecast, assessment and optimization of impacts on natural ecosystems. In: A. Sydov et al. (Eds.). Systems Analysis and Simulation. Berlin: Akademie Verlag, 1985, pp. 114-124.
20. Svirzhev, Yu.M., Krapivin V.F., Tarko A.M.. Modelling of the main biosphere cycles. In: T.F. Malone and J.G. Roederer (Eds.). Global Change. New York: ICSU Press, 1985, pp. 298-313.
21. Svirzhev, Yu.M., Krapivin V.F., Tarko A.M., Vilkoova L.P. New results in modeling of the global biocenotic processes. Proc. of the Int. Symposium on the Coevolution of Man & Biosphere of Institute de la vie, Helsinki (Finland), September 1983, pp. 1-69.