

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

DOI: 10.36535/0235-5019-2020-07-1

УДК 502/504:001

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВА МОДЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВЫЖИВАНИЯ СИСТЕМЫ КЛИМАТ-БИОСФЕРА-ОБЩЕСТВО

Проф. С.А. Варотсос¹, проф. В.Ф. Крапивин², проф. Ф.А. Мкртчян²,
канд. техн. наук И.И. Потапов³, канд. физ.-мат. наук В.Ю. Солдатов²

¹) Department of Environmental Physics and Meteorology, University of Athens,
Athens, Greece. covar@phys.uoa.gr

²) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

³) Всероссийский институт научной и технической информации ВИНТИ РАН,
ipotapov37@mail.ru

STATE AND PERSPECTIVE OF THE SURVIVABILITY MODEL ASSESSMENT OF CLIMATE-BIOSPHERE-SOCIETY SYSTEM

C.A. Varotsos, V.F. Krapivin, F.A. Mkrtchyan, I.I. Potapov, V.Yu. Soldatov

Ключевые слова: климат, биосфера, общество, модель, живучесть, биологическая сложность, океан, почвенно-растительная формация, биогеохимический цикл.

Keywords: climate, biosphere, society, model, survivability, biocomplexity, ocean, soil-plant formation, biogeochemical cycle.

На основе совершенствования информационных технологий предложен конструктивный подход для моделирования глобальных процессов в системе климат-биосфера-общество, позволяющий адаптивно согласовать параметрическое и функциональное пространство глобальной модели. Представлена блок-схема глобальной модели системы климат-биосфера-общество и охарактеризованы функциональные возможности ее блоков. Структура модели представляет собой серию блоков, параметризующих глобальные биогеохимические циклы, гидрологический цикл, демографические процессы и простую модель климата. Показатель выживаемости используется как критерий живучести человечества. Он отражает динамику общей биомассы биосферы с учетом тенденций в динамике биологической сложности экосистем суши и гидросферы. Прогнозные возможности глобальной модели демонстрируются на конкретных примерах антропогенных сценариев. Рассматривается классификация наземной экосистемы с выделением 30 типов почвенно-растительных формаций для географических пикселей $4^\circ \times 5^\circ$. Человечество представлено тремя традиционными группами экономического развития. Мировой океан представлен тремя широтными зонами. Результаты моделирования показывают динамику системы климат-биосфера-общество до начала 23-го столетия: численность населения мира может достичь уровня 14 миллиардов без возникновения заметных негативных процессов.

A constructive approach is proposed for the global modeling of processes in the climate-nature-society system based on the information technology that allows the adaptive agreement of parametrical and functional space of global model. Block-diagram is represented for global model of the climate-nature-society system and functional capabilities of its blocks are characterized. A model structure represents a series of items describing global biogeochemical cycles, hydrological cycle, demographic processes, and simple climate model. Survivability indicator is used as a criterion of the humanity survivability. It defines a trend in the dynamics of total biosphere biomass taking into account the tendencies in biocomplexity dynamics of the land and hydro-sphere ecosystems. Global model capabilities are demonstrated by means of concrete examples. A classification of the land ecosystem is considered with the separation of 30 types of soil-plant formations for the geographical pixels $4^{\circ} \times 5^{\circ}$. Humanity is represented by three traditional groups of economical development. The World Ocean is parameterized by three latitudinal zones. Modeling results show the dynamics of the climate-nature-society system to the beginning of the 23st century: world population can reach the level of 14 billions without the occurrence of grand negative processes.

Введение

Начало XXI столетия практически не ослабило, а усугубило проблему устойчивого развития человеческого общества. Если человеческое общество находилось на пороге ядерной войны во время Карибского кризиса, то глобальная система климат-биосфера-общество (СКБО) в настоящее время находится в кризисном состоянии по ряду других не менее значимых причин. Эта проблема широко обсуждается в научной литературе [1-73]. Среди наиболее важных идей и причин нарушения устойчивости окружающей среды выделяются следующие:

- Опережающий рост населения Земли по сравнению с увеличением продуктивности сельскохозяйственных и природных экосистем приводит к уменьшению объема продовольствия на душу населения. Дефицит продовольствия является фактом во многих регионах. Подушная доля пищи уменьшается со временем и поэтому следует ожидать роста голодающих [44].

- Реакция окружающей среды на антропогенное вмешательство в природные циклы сопровождается усилением и возрастанием количества стихийных бедствий, включая возникновение новых неизлечимых болезней [62].

- Глобальное изменение климата из-за нарушения циклов парниковых газов и водных ресурсов приводит к изменению пространственного распределения водных ресурсов, включая питьевую воду [72].

- Разработка новых мощных вооружений и платформ для их оперативной доставки практически во все координаты в условиях искажения информационной среды способствует дополнительной неопределенности в проблеме выживаемости населения планеты [7].

- За обострением как международных, так и региональных конфликтов следуют кардинальные изменения в процессах глобализации и децентрализации, которые не стимулируют улучшение условий жизни населения [10].

- Одной из возможных причин глобальной экологической катастрофы может быть исчезновение насекомых-опылителей, что может произойти как экологическое следствие средств мобильной связи, включая мобильные телефоны [60].

Тем самым нарастание глобальных негативных процессов в СКБО ставит перед человечеством проблему выживания в будущем. В настоящее время решение задачи устойчивого развития СКБО предпринимается в основном на региональных уровнях, что, как показывается многими экспертами, становится не реализуемым [32,33]. Принимаемы на уровне ООН решения по защите окружающей среды и подписываемые многими государствами соглашения практически не выполняются. Необходимо сформировать конструктивную информационную технологию, которая позволит комплексно описывать глобальные экологические, демографические, социально-экономические и климатические процессы, происходящие в СКБО. Это дает возможность поиска конструктивных стратегий выживаемости СКБО с учетом существующих оценок и прогнозов динамики природных ресурсов. Краеугольным камнем концепции устойчивого сосуществования природы и человека является соглашение о том, что все страны должны искать взвешенные стратегии для эволюции биосферно-популяционной системы с учетом реального состояния биосферных резервуаров.

Население планеты в своей тенденции к сокращению бедности должно понимать, что энергетические и продукционные резервы биосферы являются ограниченными. Поэтому комплексными целями мирового населения являются исследование и мониторинг, связанные с сохранением и устойчивым развитием. Что касается этой проблемы, существует много исследований, основанных на глобальных моделях [2,15,22,23,32,33,37]. Эти и другие исследования глобальных экологических и экономических процессов основаны на различных моделях современного представления о структуре СКБО. Многие из них носят виртуальный характер, основанный на философско-идеологическом понятии государства.

Приемлемый конструктивный подход к моделированию глобальной окружающей среды был предложен в работах академика Н.Н. Моисеева и его соавторов [50], которые четко сформулировали концептуальную модель биосферы, принципиально отличающуюся от известных глобальных моделей Римского клуба [16,17,45,46,56]. В результате проведенных исследований был разработан математический подход к моделированию глобальной окружающей среды и проведены эксперименты по моделированию глобальных процессов в окружающей среде, в том числе оценки последствий антропогенного воздействия на биосферные экосистемы [12,13,27,29,61]. Различия между моделями Римского клуба и другими моделями в основном заключается в методических принципах [59]:

- Авторы моделей Римского клуба сосредоточили основное внимание на глобальных экономических процессах, связывая их с отдельными экологическими процессами и выбирая демографический блок в качестве основного элемента глобальной модели.

- Исходным положением теории Моисеева [50] было исследование биосферы, в котором человек рассматривался как элемент биосферы, а демографические и экономические процессы рассматриваются только в рамках системного анализа глобальной экологической эволюции.

Существующие социально-экономические теории устойчивого развития далеки от идей Моисеева и, конечно, от теории ноосферы академика Вернадского [70]. Многочисленные индикаторы, такие как Индекс счастливой планеты (ИЧП или Happy Planet Index (HPI)), Индекс человеческого развития (ИЧР или Human development Index (HDI)), Индекс производства продуктов питания (ИПП или Food Production Index (FPI)), Валовой внутренний продукт (ВВП или Gross Domestic Product (GDP)) и другие, несомненно, помогают оценить тенденции разви-

тия в конкретном сечении СКБО, но затрудняют комплексную оценку эволюции СКБО. Это возможно только при использовании глобальной модели, позволяющей учесть максимальное количество прямых и косвенных связей, существующих в СКБО.

Тенденция к совершенствованию глобальных моделей характеризуется попытками повысить их точность и снизить требования к информационному обеспечению. Сложность организованной реальности одновременно препятствует этому подходу к совершенствованию и привносит комплекс ограничений, связанных с многомерностью и хаотическими процессами в окружающей среде. Это аксиома для многих исследователей глобального мира [12,13,73]. Действительно, каждая глобальная модель имеет индивидуальный характер, учитывая и концентрируясь на ограниченном ряду экологических процессов и элементов. Krapivin и др. [36-38] предложили новый подход к синтезу глобальной модели, основанный на использовании высокоуровневых сред для отдельных операций, связанных с описанием процессов в СКБО. Была разработана геоэкологическая информационно-моделирующая система (ГИМС), архитектура которой основана на комбинированном использовании ГИС-технологии и инструментов моделирования.

В данной статье с учетом существующих глобальных моделей, описывающих различные процессы в СКБО, предлагается использовать ГИМС в качестве универсальной среды для комплексной параметризации наиболее важных глобальных процессов для поиска устойчивого состояния между природой и человеческим обществом [38,52]. Исходя из традиционной концепции и цивилизованного восприятия процессов в СКПО, архитектура глобальной модели ГИМС/СКБО создана для демонстрации интегральной схемы прямых и косвенных отношений между этими процессами. ГИМС/СКБО состоит из множества блоков, каждый из которых решает свою задачу. Блоки ГИМС/СКБО функционально автономны и обмен данными между ними осуществляется только через универсальную информационную магистраль.

Общее описание модели ГИМС/СКБО

Ключевым аспектом оценки живучести человечества является экологическая ситуация естественной эволюции Земли, которая определяет производство продовольствия и другие условия жизнедеятельности населения. Безусловно, уровень самоорганизации и самоструктурирования СКБО зависит от многих факторов коэволюции популяций как элементов биосферы. Поэтому синтез модели СКБО возможен только на основе синергетического подхода, который диктует форму и структуру ГИМС/СКБО. ГИМС играет управляющую роль, обеспечивая координацию между блоками СКБО и расширяя их функции. Следуя такому подходу, основные компоненты ГИМС/СКБО определяются как информационное ядро для экологических, геофизических, гидрологических, биоценологических и демографических процессов, которые происходят в разных регионах земного шара. Поверхность Земли Ξ делится на Мировой океан Ξ_O и сушу Ξ_L ($\Xi = \Xi_L \cup \Xi_O$). Поверхность суши Ξ_L покрыта географической сеткой с дискретными шагами $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_j$ по широте и долготе соответственно, так что все процессы в пикселе $\Xi_{Li} = \{(\varphi, \lambda): \varphi_i \leq \varphi \leq \varphi_i + \Delta\varphi_i; \lambda_j \leq \lambda \leq \lambda_j + \Delta\lambda_j\}$ рассматриваются как однородные и параметризуются точечными моделями. Площадь каждого пикселя $\sigma_{ij} = \chi_{\varphi} \chi_{\lambda} \Delta\varphi_i \Delta\lambda_j$ занимают почвенно-растительные формации (τ_1 -я часть), сельскохозяйственная растительность (τ_2 -я часть), гидрофизические объекты (τ_3 -я часть) и антропоген-

ные объекты $((1-r_1-r_2-r_3) \cdot \chi)$ -я часть), где χ_ϕ (≈ 111 км) и χ_λ ($= 111,3 \cos \phi$) - количество километров в одном градусе широты и долготы соответственно.

В случае Мирового океана выделены три широтные зоны: экваториальная зона $\Xi_{O1} = \{(\phi, \lambda): \phi \in [0^\circ N, 30^\circ N] \cup [0^\circ S, 30^\circ S]; 0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ\}$, умеренные широты $\Xi_{O2} = \{(\phi, \lambda): \phi \in [30^\circ N, 60^\circ N] \cup [30^\circ S, 60^\circ S]; 0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ\}$, Арктика и Антарктика $\Xi_{O3} = \{(\phi, \lambda): \phi \in [60^\circ N, 90^\circ N] \cup [60^\circ S, 90^\circ S]; 0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ\}$. Пелагические Ξ_{O1P} и апвеллинговые Ξ_{O1U} акватории выделяются в зоне Ξ_{O1} , чтобы различаться по производительности и скорости газообмена на границе воздух-вода [34,40].

На рис. 1 и в табл. 1 представлена блочная структура ГИМС/СКБО, синтезированная с учетом компонентов и параметров глобальной биогеосистемы, управление которой осуществляется системами геоинформационного мониторинга. Пространственная структура ГИМС/СКБО определяется доступной базой данных и базой знаний. Самый простой вариант точечной модели реализуется, когда Мировой океан и суша считаются уникальным элементом земного шара. Пространственная неоднородность может быть реализована с учетом разрешающих способностей спутниковых систем мониторинга окружающей среды. Основной формой пространственной дискретизации является выбор равномерной сетки пикселей $\Delta\phi \times \Delta\lambda$. ГИМС допускает различную пространственную сетку для каждого блока модели СКБО, поддерживающую возможность интеграции пикселей Ξ_{Li} . Такого рода пространственная структура биосферы позволяет адаптировать модель к неоднородностям в базах данных и проводить имитационные эксперименты с актуализацией отдельных регионов.

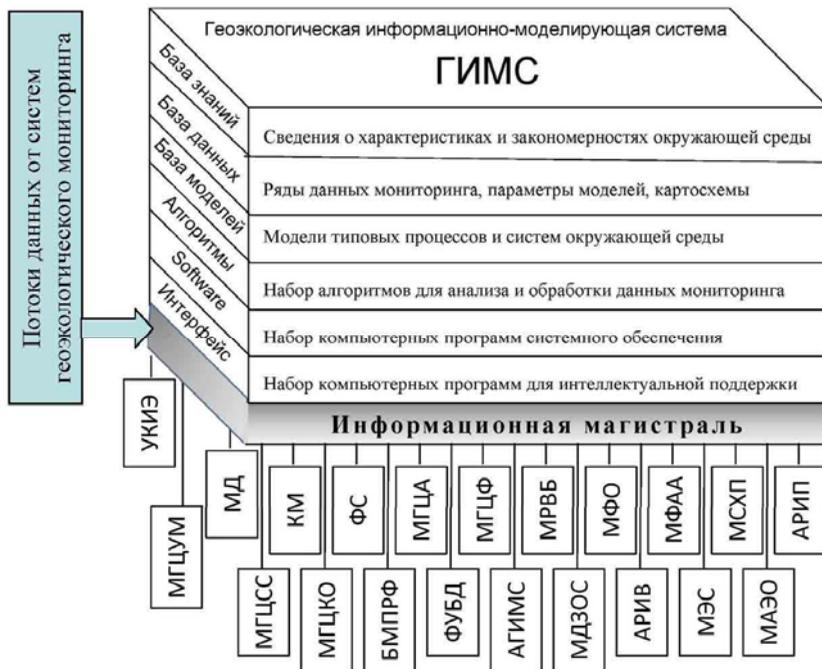


Рис.1. Блок-схема ГИМС/СКБО. Расшифровка аббревиатуры приведена в Таблице 1.

Таблица 1.

Функциональные блоки ГИМС/СКБО

Блок	Функции блока
МД	Модель демографии [24].
КМ	Климатическая модель [3,37,47].
МГЦУМ	Модель глобального цикла углекислого газа и метана [3,40,68].
МГЦСС	Модель глобального цикла соединений серы [20].
МГЦКО	Модель глобального цикла кислорода и озона [37]
МГЦА	Модель глобального цикла азота [24].
МГЦФ	Модель глобального цикла фосфора [24].
МРВБ	Модель регионального водного баланса [24].
БМПРФ	Биоценотическая модель почвенно-растительной формации [4,24,29,31,35].
МФО	Модель фотосинтеза в тропическом и умеренном секторах океанов [28].
МФАА	Модель фотосинтеза в арктических и антарктических зонах Мирового океана [21,22,39].
МСХП	Модель сельскохозяйственного производства [1,9].
АРИП	Алгоритм расчета индикатора произведенной в биосфере пищи [11].
МАЭО	Модель апвеллинговой экосистемы океана [23,28].
МЭС	Модель типовой водной экосистемы суши [31].
АРИВ	Алгоритм расчета индикатора выживания населения [32].
МДЗОС	Модель динамики загрязнителей окружающей среды [22,68].
АГИМС	Адаптация структуры ГИМС к условиям имитационного эксперимента [41].
ФУБД	Формирование и управление базой данных.
ФС	Формирование сценариев взаимодействия общества с природной средой.
УКИЭ	Управление и контроль имитационного эксперимента.

В зависимости от специфики рассматриваемого природного процесса региональная структура может быть идентифицирована с климатическими и широтными зонами, континентами, природными биомами и социально-административными структурами. Например, Tarco [66] делит наземную биосферу на пиксели с размерами $\Delta\varphi=4^\circ$ и $\Delta\lambda=5^\circ$, а Мировой океан на 15 экологических зон. Современные возможности спутникового мониторинга позволяют изучать биогеоэкономические процессы при $\Delta\varphi=\Delta\lambda=0.5^\circ$ (Sellers et al., 1996). Социально-экономические процессы обычно представляются регионами в зависимости от их развития. Атмосферные процессы в биогеохимических циклах долгоживущих элементов аппроксимируются точечными моделями [51,52] функционирующие океанические экосистемы представлены неоднородной пространственной структурой, включающей пиксели Ξ_{Oij} шельфовой зоны и пелагические зоны четырех океанов [34]. Tarco [66] разработал Московскую модель глобальной биосферы, в которой Мировой океан представлен верхним квазиоднородным и глубоким слоями отдельно для четырех широтных зон в северной и южной акваториях. ГИМС позволяет комбинированное использование этих параметризаций.

Описание блоков ГИМС/СКБО

Блоки ГИМС/СКБО, перечисленные в табл. 1, осуществляют расчеты потоков энергии и вещества между пикселями пространственной структуры биосферы. Стабильность ГИМС/СКБО обеспечивается информационными каналами, которые соединяют функциональные блоки, так что изменение или модификация блока не влияет на другие блоки.

Блок АГИМС обеспечивает символично-параметрическую идентификацию пикселей, включая почвенно-растительные формации (см. рис. 2), источники загрязняющих веществ, водные экосистемы и население. В результате формируются символичные матрицы как пространственные идентификаторы элементов СКБО. Блок АРИВ решает задачу оценки уровня выживаемости населения на основе имеющихся показателей. Одним из них является индикатор живучести:

$$J(t) = \frac{1}{\sigma} \left\{ \sum_{(i,j) \in \Xi_L} \sigma_{ij} \left[r_1 \frac{R_{\Phi}^1(i,j,t)}{R_{\Phi}^1(i,j,t_0)} + r_2 \frac{R_{\Phi}^2(i,j,t)}{R_{\Phi}^2(i,j,t_0)} + r_3 \frac{R_{\Phi}^3(i,j,t)}{R_{\Phi}^3(i,j,t_0)} \right] + \sum_{s=1}^3 \sigma_{\alpha_s} \frac{R_P(s,t)}{R_P(s,t_0)} \right\} \quad (1)$$

где

$$R_{\Phi}^k(i,j,t) = R_{\Phi}^{*k}(i,j) \min \left\{ a_c \frac{C_A(t) - \Gamma(i)}{b_c + C_A(t) + \Gamma(i)}, \frac{a_E E(i,t)}{b_E + E(i,t)}, \frac{a_W W(i,j,t)}{b_W + W(i,j,t)}, R_T(i,t) \right\} + M_{\Phi}^k(i,j,t)$$

$$R_T(i,t) = \max \left\{ 0, \frac{T(i,t) - T_{\min}(\kappa)}{T_{opt}(\kappa) - T_{\min}(\kappa)} \exp \left[a_T - b_T \frac{T(i,t) - T_{\min}(\kappa)}{T_{opt}(\kappa) - T_{\min}(\kappa)} \right] \right\}$$

$$M_{\Phi}^k(i,j,t) = K_B \Phi^{*k}(i,j) \max \left\{ 0, \frac{\rho_T T(i,t)}{d_T + T(i,t)}, \frac{d_a W(i,j,t)}{d_b + W(i,j,t)} \right\}$$

$$T(i,t) = T_g(t) + (T_N(t) - T_e(t)) (\sin^2 \phi_T - \sin^2(4i))$$

$$R_P(s,t) = R_P^{*s} \min \{ Y_0(T_W), Y_1(E), Y_2(n), Y_3(P) \}, s = 1, 2, 3;$$

$$Y_0(T_W) = \frac{T_W}{T_{Wopt}} \exp \left[\theta_W \left(1 - \frac{T_W}{T_{Wopt}} \right) \right], \quad Y_1(E) = \frac{E}{E_{\max}} \exp \left[\theta_E \left(1 - \frac{E}{E_{\max}} \right) \right]$$

$$Y_2(n) = \left[1 - \exp \left\{ -\gamma_n \frac{n(s,t)}{n(s,t_0)} \right\} \right]^{\theta_n}, \quad Y_3(P) = 1 - \exp \left\{ -\gamma_P \frac{P(s,t)}{P(s,t_0)} \right\}$$

Γ - константа компенсации фотосинтеза (изменяется от 5 на экваторе до 50 на полюсе), C_A - содержание CO_2 в атмосфере (ppmv), E - солнечная радиация (W/m^2), W - осадки (мм/год), T_N и T_e - глобальные температуры на полюсе и экваторе, соответственно ($^{\circ}\text{C}$); T_g - средняя глобальная температура ($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} and T_{opt} являются критическими и оптимальными температурами для фотосинтеза ($^{\circ}\text{C}$),

соответственно [18,19]; φ_T - широта, на которой $T(i,t)=T_g$; E_{max} - солнечная радиация, соответствующая максимальному фотосинтезу; n - содержание биогенных солей ($\text{мг}/\text{м}^2$); P - биомасса фитопланктона ($\text{мг}/\text{м}^2$); a_C (3.226), b_C (930.03), a_E (1.177), b_E (60.538), a_W (4.742), b_W (592.357), a_T (0.56), b_T (0.42), ρ_T (1.214), d_T (5.714), d_a (0.0267), d_b (208.333), θ_W (0.21), θ_E (0.25), θ_n (0.6), γ_n (0.1), и γ_P (0.25) - коэффициенты адаптации, обеспечивающие согласование между моделью и предысторией трендов CO_2 , глобальной температуры и численности населения; $\sigma=510.1 \times 10^6 \text{ km}^2$; $t_0(2015)$ - время начала вычислений, когда средняя глобальная продукция оценивается как $R_\Phi^*(2015)=48.7 \text{ PgC}/\text{г}$ and $R_p^*(2015)=56.2 \text{ PgC}/\text{г}$. При этом $R_p^1 = 0.049 \text{ PgC}/\text{сут}$ in Ξ_{O3} , $R_p^2 = 0.033 \text{ PgC}/\text{сут}$ in Ξ_{O1} , and $R_p^3 = 0.072 \text{ PgC}/\text{сут}$ in Ξ_{O3} [4,8,57].

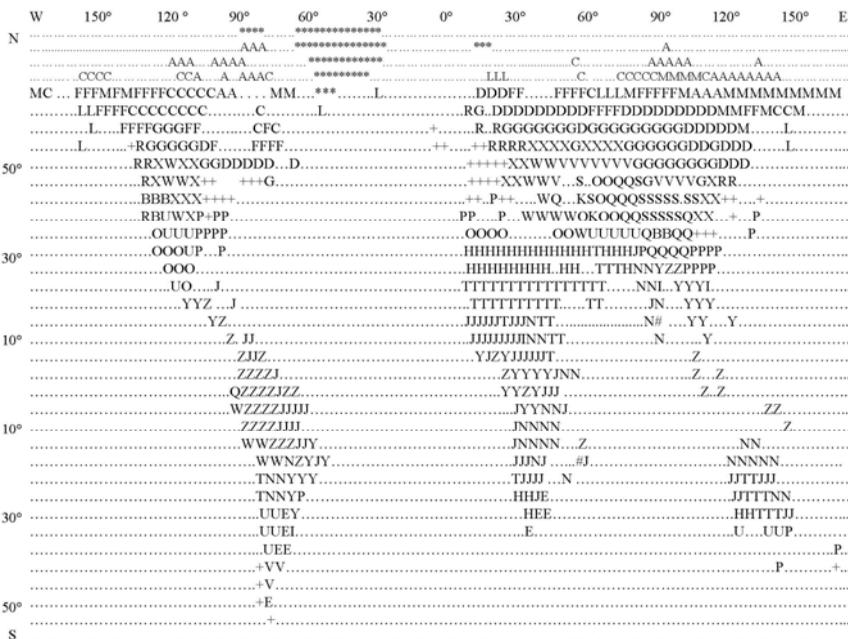


Рис. 2. Пространственное распределение типов почвенно-растительных формаций, представленных в табл. 2. Биомные индикаторы поясняются в табл. 2.

Индикатор $J(t)$ является интегральной характеристикой сложности СКБО, отражающей индивидуальность её структуры и эволюции в момент времени t . В соответствии с законами естественной эволюции уменьшение или увеличение $J(t)$ будет отражать способность СКБО к выживаемости. Кроме того, уменьшение $J(t)$ соответствует отрицательному нарушению биогеохимических циклов, которые интенсифицируют процессы истощения ресурсов и смещают вектор энергетического обмена между основными функциями СКБО. В частности, снижение $J(t)$ приводит к сокращению общих запасов продовольствия, что может быть отражено в индексе производства продовольствия (ИПП), который является функцией климата, научно-технического прогресса и экономических факторов [1].

Блок КМ обеспечивает вычисление пространственного распределения среднегодовой температуры атмосферы на основе простой климатической модели Mintzer [47] модифицированной в работе [37]:

$$\Delta T_g = \Delta T_{CO_2} + \Delta T_{N_2O} + \Delta T_{CH_4} + \Delta T_{O_3} + \Delta T_{CFC11} + \Delta T_{CFC12}, T(\varphi) = T_g + \gamma(\sin^2 \varphi_T - \sin^2 \varphi), \quad (2)$$

где γ -разность атмосферных температур между полюсом и экватором; φ_T - широта, где $T(\varphi) = T_g$,

$$\Delta T_{CO_2} = -0.677 + 3.019 \ln[C_A(t)/C_A(t^*)], \Delta T_{N_2O} = 0.057[N_2O(t)^{1/2} - N_2O(t^*)^{1/2}],$$

$$\Delta T_{CH_4} = 0.019[CH_4(t)^{1/2} - CH_4(t^*)^{1/2}], \Delta T_{O_3} = 0.7[O_3(t) - O_3(t^*)]/15,$$

$$\Delta T_{CFC11} = 0.14[CFC11(t) - CFC11(t^*)], \Delta T_{CFC12} = 0.16[CFC12(t) - CFC12(t^*)].$$

где C_A – концентрация CO_2 в атмосфере (ppm).

Таблица 2.

Количественные характеристики типов наземной растительности.

Обозначения: σ_S – площадь формации (млн. км²), R_ϕ - годовой прирост биомассы (кг·м²год⁻¹), Φ - фитомасса (кг/м²), D_S - мертвое органическое вещество (кг/м²).

Индикатор и тип почвенно-растительной формации	σ_S	R_ϕ	Φ	D_S
<i>A</i> -Арктические пустыни и тундры	2,55	0,17	0,4	1,3
<i>C</i> -Тундры	2,93	0,36	1,9	5,6
<i>M</i> - Горные тундры	2,33	0,38	1,9	5,5
<i>L</i> - Лесо-тундра	1,55	0,65	3,8	9,0
<i>F</i> -Северные таежные леса	5,45	0,54	10,0	8,1
<i>D</i> - Среднетаежные леса	5,73	0,63	22,5	10,8
<i>G</i> - Южнотаежные леса	6,60	0,65	23,5	14,5
<i>R</i> - Широколиственные хвойные леса	2,12	0,87	25,0	25,1
+ -Широколиственные леса	7,21	1,25	45,0	24,8
<i>P</i> - Субтропические широколиственные и хвойные леса	5,75	1,72	43,0	22,2
<i>U</i> - Ксерофитные редколесья и кустарники	3,91	0,56	3,8	15,0
<i>X</i> - Лесостепи (луговые степи)	3,72	0,74	1,9	38,0
<i>W</i> - Умеренно засушливые и засушливые степи (в том числе горные)	4,29	0,79	1,9	33,0
<i>E</i> - Пампы и травянистые саванны	1,66	1,11	3,8	21,0
<i>V</i> - Сухие степи	2,66	0,38	0,8	12,6
#- Мангровые леса	2,08	0,45	0,4	12,1
<i>S</i> - Суббореальные пустыни	2,69	0,25	0,2	8,1
&-Субтропические полупустыни	1,99	0,35	0,8	8,8
<i>H</i> - Субтропические пустыни	7,16	0,12	0,1	1,4
<i>B</i> - Высокогорные пустыни	1,15	0,47	0,8	16,9
<i>Q</i> - Альпийские и субальпийские луга	3,54	0,76	1,9	24,0
<i>Z</i> - Влажные вечнозеленые тропические леса	10,4	3,17	60,0	21,6
<i>Y</i> - Переменно-влажные листопадные тропические леса	7,81	2,46	60,0	20,5
<i>N</i> - Тропические ксерофитные открытые редколесья	9,18	1,42	10,0	15,1
<i>J</i> -Тропические саванны	17,1	1,35	0,1	2,0
<i>T</i> - Тропические пустыни	11,5	0,18	0,4	4,9
<i>K</i> - Солончаки	0,38	0,18	45,0	21,6
<i>I</i> - Субтропические и тропические травяно-древесные заросли тугайского типа	0,9	1,96	45,0	21,6
* -Отсутствие растительности	14,6	0	0	0

Значение t^* идентифицируется с 1980 годом, когда были известны концентрации парниковых газов (CO_2 337.7 ppmv; N_2O 270 ppb; CH_4 722 ppb; CFC11 167.99 ppb; CFC12 307.75 ppb). Блоки МГЦУМ, МГЦА и МГЦКО рассчитывают концентрации $C_A(t)$, $\text{N}_2\text{O}(t)$, $\text{CH}_4(t)$, $\text{O}_3(t)$ с использованием соответствующих моделей, а также CFC11(t), и CFC12(t) с учетом данных, полученных в [5]. Блок МД реализует модель динамики численности населения $G(i,j,t)$ с учетом влияния факторов окружающей среды:

$$dG(i,j,t)/dt=R_G(i,j,t)-M_G(i,j,t), \quad (4)$$

где R_G и M_G - показатели рождаемости и смертности, соответственно. Рождаемость и смертность в основном зависят от питания и экологических характеристик. Подробное описание этих функций дано в [24], где функции $R_G(i,j,t)$ и $M_G(i,j,t)$ в (4) формализуются с помощью следующих уравнений:

$$R_G(i,j,t)=\mu_B G(i,j,t), M_G(i,j,t)=\mu_d G^\omega(i,j,t), \quad (5)$$

где μ_B и μ_d - коэффициенты, характеризующие рождаемость и смертность соответственно; ω - показатель влияния плотности населения на смертность. Эти коэффициенты являются функциями экологических и антропогенных характеристик:

$$\begin{aligned} \mu_B = & \rho \min \{ \mu_1(1-\text{HDI}) + \mu_2 \text{HDI}; \mu_1(1-\text{HPI}) + \mu_2 \text{HPI}; \\ & \mu_1 \exp[-\xi_1 \text{FPI}/\text{FPI}(t_0)] + \mu_2 [1 - \exp\{-\xi_1 \text{FPI}/\text{FPI}(t_0)\}]; \\ & \mu_1 \exp[-\xi_2 \text{GDP}/\text{GDP}(t_0)] + \mu_2 [1 - \exp\{-\xi_2 \text{GDP}/\text{GDP}(t_0)\}]; \\ & \mu_1 \exp[-\xi_3 V_G] + \mu_2 (1 - \exp[-\xi_3 V_G]) \}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu_d = & \beta \min \{ \eta_1(1-\text{HDI}) + \eta_2 \text{HDI}; \eta_1(1-\text{HPI}) + \eta_2 \text{HPI}; \\ & \eta_1 \exp[-\chi_1 \text{FPI}/\text{FPI}(t_0)] + \eta_2 [1 - \exp\{-\chi_1 \text{FPI}/\text{FPI}(t_0)\}]; \\ & \eta_1 \exp[-\chi_2 \text{GDP}/\text{GDP}(t_0)] + \eta_2 [1 - \exp\{-\chi_2 \text{GDP}/\text{GDP}(t_0)\}]; \\ & \eta_1 \exp[-\chi_3 V_G] + \eta_2 (1 - \exp[-\chi_3 V_G]) \}, \end{aligned} \quad (7)$$

где μ_1 и μ_2 - коэффициенты максимальной и минимальной рождаемости соответственно; η_1 и η_2 - максимальная и минимальная смертность соответственно; ρ , β , χ_1 , χ_2 , χ_3 , ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 - коэффициенты адаптации к статистическим данным; V_G - эффективное количество пищи, которое определяется как взвешенная сумма компонентов персонального спектра продуктов питания, которая рассчитывается блоками МАЭО, МФАА, МЭС и МФС. В общем случае имеем:

$$V_G(t) = \left\{ \sum_{(i,j) \in \Xi_L} \sigma_{ij} \left[r_1 d_1 R_\Phi^1(i,j,t) + r_2 d_2 R_\Phi^2(i,j,t) + r_3 d_3 R_\Phi^3(i,j,t) \right] + d_4 \sum_{s=1}^3 R_p(s,t) \right\} / \sum_{(i,j) \in \Xi_L} \sigma_{ij} G(i,j,t)$$

где d_1 (0.023), d_2 (0.65), d_3 (0.11) и d_4 (0.013) - коэффициенты, которые определяют вклад продукции естественной растительности, сельскохозяйственных растений, водных экосистем суши и океанов соответственно в спектр питания населения,

Каждый пиксель Ξ_{ij} характеризуется уровнем биологической сложности и участвует в производстве продуктов питания как элемент зоны ограниченного доступа, которая может объединять различные биомы, экосистемы и антропогенные

территории. Для уточнения формального описания пространственной структуры СКБО выбраны три социально-экономические группы стран, которые будут представлены соответствующими площадями Ξ_L : Ξ_{LD} обозначает площадь, занимаемую странами с $HDI \in [0,85,1]$, площадь Ξ_{LM} занята странами с переходной экономикой ($HDI \in (0,65,0,85)$) и Ξ_{LG} соответствует территории развивающихся стран ($HDI \in [0,0,0,65]$). Социальные издержки, экономическое развитие, отсутствие продовольственной безопасности и нарушение окружающей среды в пределах каждой территории показаны с различной интенсивностью. Обеспеченность пищей осуществляется из доступных источников:

- Сельскохозяйственные технологии являются основным производителем продуктов питания, которые могут повысить продовольственную безопасность и безопасность питания. Глобальное сельское хозяйство обеспечивает 2940 ккал на человека в настоящее время с прогнозом до 3050 к 2030 году. Существующая белковая поддержка человека оценивается в 60г в день, когда медицинская норма составляет 70г. Общий дефицит белка оценивается от 10 до 25 миллионов тонн. Около половины населения Земли (7,5 миллиардов) страдают от дефицита белка [11].

- Вторым важным источником пищи является рыболовство и выращивание рыбы в естественных озерах и водоемах. В 2016 году каждый человек потреблял около 22 кг рыбной продукции. В настоящее время экосистемы Мирового океана и морей обеспечивают около 20% мировых потребностей в белках животного происхождения. В основном, океаническая биомасса оценивается 150 тысячами видов животных и 10 тысячами водных растений, которые имеют общий вес около 35 миллиардов тонн, что вполне достаточно для существования 35 миллиардов человек [43].

- Естественные растения и леса в первую очередь могут рассматриваться как гипотетические источники пищи, включая диких животных и съедобные растения, фундук и т.д. Дальнейшее развитие пищевой промышленности и соответствующей науки позволяет расширить использование первичной природной биомассы для производства продуктов питания.

Как следует из рисунков 3-5, общая тенденция производства продуктов питания в разных странах характеризуется устойчивым повышением темпов производства продуктов питания. Практически в начале 21 столетия большинство стран достигли сопоставимых уровней производства продуктов питания. Но проблема распределения пищи среди населения пока не решена. Эта проблема достаточно сложна и связана с социально-экономическим и культурно-идеологическим пространством, разделы которого могут быть кардинально различны в зависимости от идеологии и традиционной концепции социальной справедливости, поиск которой осуществляется с помощью различных индикаторов [6]. Согласно результатам, показанным на рисунках 6 и 7, индикаторное пространство СКБО имеет много неопределенностей, которые могут быть связаны с существующими причинами неравномерного распределения жизненно важных ресурсов.

В условиях мирного сосуществования проблема выживаемости населения сводится к его продовольственному обеспечению, что необходимо для поиска зависимости глобального распределения запасов продовольствия и воды от курса вектора глобализации.

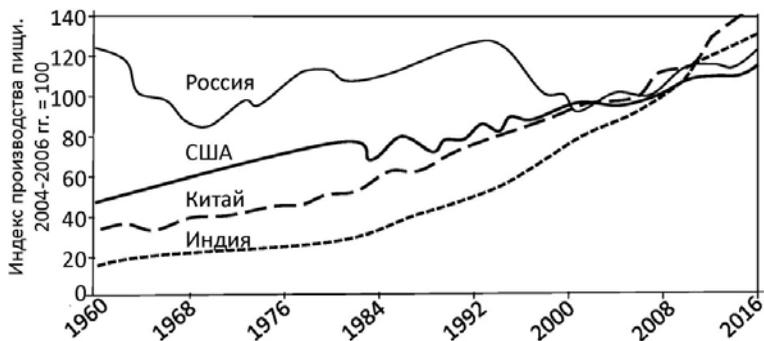


Рис. 3. Показатели производства продуктов питания в крупных странах.

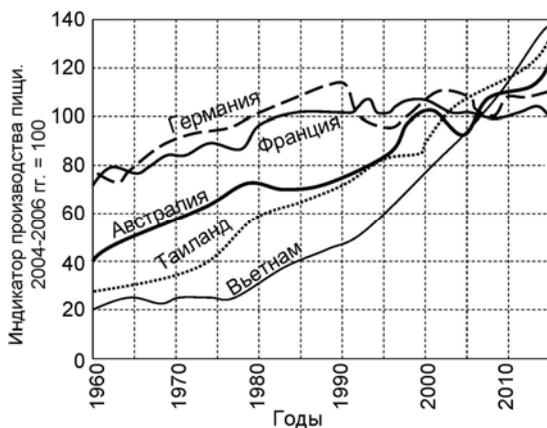


Рис. 4. Сравнение показателей производства продуктов питания в развитых и развивающихся странах.

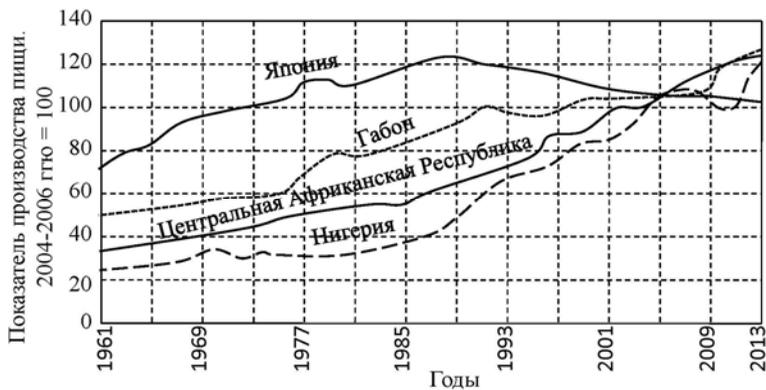


Рис. 5. Сравнение показателей производства продуктов питания в развитых и слаборазвитых странах.

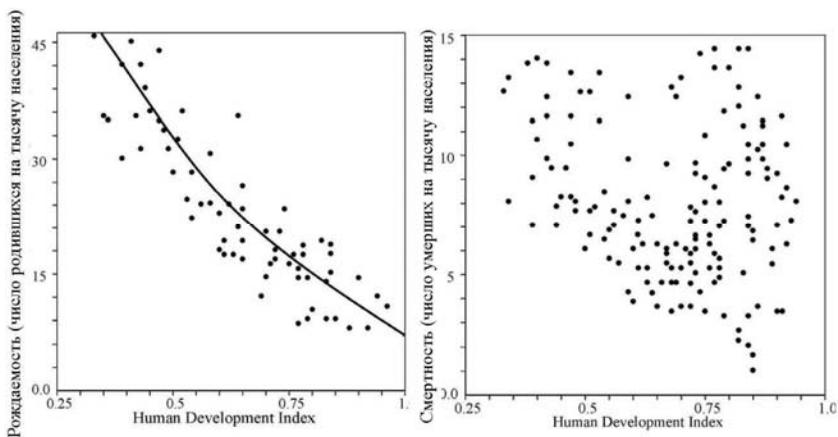


Рис.6. Зависимость рождаемости и смертности от индекса развития человеческого потенциала, принятого странами.

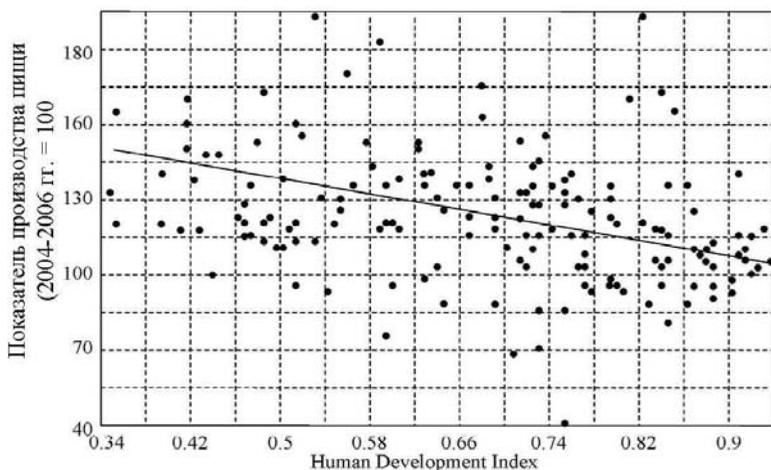


Рис.7. Взаимозависимость показателей производства продуктов питания (Food Production Index - FPI) и развития человеческого потенциала (Human Development Index - HDI) для разных стран.

Имитационные эксперименты

ГИМС/СКПО позволяет эмитировать различные экологические ситуации, используя информацию и данные, которые определяют конкретные характеристики поверхности земли, распределение почвенно-растительных формаций и гидросферы. Поверхность суши покрыта дискретным количеством типов растительности, представленных на рис. 2 и в табл. 2. Численные значения параметров ГИМС/СКПО приведены в табл. 3. Конечно, эти параметры могут изменяться во времени, но незначительно. Чтобы учесть этот аспект, здесь эти параметры представлены для трех регионов.

Кoeffициенты ГИМС/СКБО для поверхности Земли.

Кoeffициент	Регион Ξ_{LD}	Регион Ξ_{LM}	Регион Ξ_{LG}
ρ, yr^{-1}	1.19	1.26	1.32
β, yr^{-1}	1.21	1.23	1.25
η_1	0.01	0.011	0.014
η_2	0.003	0.005	0.009
ξ_1	0.031	0.027	0.025
ξ_2	0.012	0.011	0.009
ξ_3	0.006	0.005	0.004
χ_1	0.035	0.032	0.031
χ_2	0.014	0.012	0.011
χ_3	0.003	0.002	0.001
μ_1	0.02	0.03	0.04
μ_2	0.005	0.009	0.012
$\gamma, ^\circ\text{C}$	34	34	34
ω	0.56	0.61	0.67

Ясно, что точность прогноза может быть оценена только через много лет и десятилетий. Тем не менее, комплекс идей и предположений, заложенных в структуру ГИМС/СКБО, учитывают полную структуру биосферы и формируют механизмы для конструктивного описания прямых и обратных отношений в СКБО, определяемых критерием (1). Биологическая сложность окружающей среды в точности определяет уровень питания для населения мира. Как следует из рис. 8, вклад наземных экосистем в это содержание имеет неоднородное пространственное распределение. Соответствующее синхронное пространственное распределение характерно для сельского хозяйства и рыболовства.

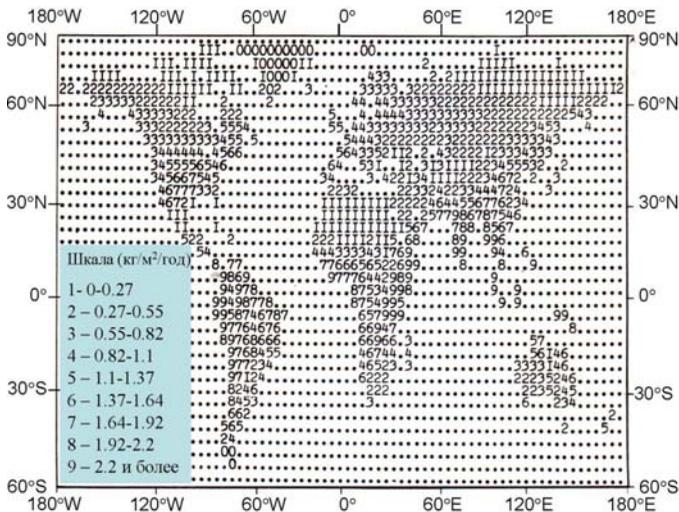


Рис. 8. Карто-схема продуктивности почвенно-растительных формаций (табл. 2).
Пространственное разрешение $4^\circ \times 5^\circ$.

Блоки ГИМС/СКБО, которые рассчитывают среднюю региональную температуру (блок КМ) и моделируют региональный гидрологический баланс (блок МРВБ), позволяют оценить продукцию наземной растительности (блок БМПРФ) в зависимости от температуры и количества осадков. Фрагмент таких оценок приведен в табл. 4.

Таблица 4.

Зависимость годовой продукции растительности $R_{\phi}(T_{\Sigma}, W_{\Sigma})$ (кг/м²/год) от средней годовой температуры (T_{Σ}) и количества осадков (W_{Σ}).

Осадки, W_{Σ} (мм / год)	Температура атмосферы, T_{Σ} (°C)											
	-14	-10	-6	-2	2	6	10	14	18	22	26	30
3130							3.39	3.49	3.68	3.81	3.92	4.01
2880							3.27	3.36	3.47	3.63	3.73	3.82
2630							3.09	3.27	3.31	3.44	3.54	3.65
2380							2.85	2.93	3.09	3.12	3.22	3.33
2130							2.57	2.69	2.67	2.94	2.91	3.03
1880						1.63	2.38	2.38	2.43	2.55	2.62	2.74
1630				0.39	0.62	1.34	2.04	2.14	2.12	2.26	2.35	2.42
1380		0.18	0.31	0.41	0.73	1.16	1.75	1.91	1.95	2.13	2.18	2.09
1130	0.19	0.26	0.32	0.43	0.77	1.05	1.66	1.84	1.92	1.84	1.83	1.75
880	0.21	0.28	0.42	0.52	0.83	0.92	1.53	1.43	1.33	1.36	1.27	1.24
630	0.28	0.29	0.53	0.57	0.89	0.91	0.92	0.85	0.84	0.73	0.72	0.71
380	0.39	0.41	0.54	0.69	0.66	0.64	0.67	0.57	0.56	0.55	0.43	0.42
130	0.14	0.32	0.31	0.22	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.14	0.13	0.11

Следует отметить, что уровень живучести $J(t)$ является наиболее важным показателем для каждого региона. ГИМС/СКБО формирует динамику населения в пиксельной структуре мира и с учетом соответствующих взаимодействий между биосферой и климатической системой. Несомненно, предложенная здесь реализация ГИМС/СКБО не ограничивает сложность реальных наземных и гидрофизических систем, учитываемых в имитационном эксперименте. Наоборот создаются условия для улучшения структуры модели СКБО, что обеспечивает более точный расчет динамики численности населения.

Внутренний ресурс каждого региона определяется уровнем валового внутреннего продукта (ВВП) и его распределением по стратегическим целям. Кривые на рис. 9 показывают зависимость выживаемости СКБО от распределения инвестиций и показывают уровень жизни населения в зависимости от распределения ВВП по экономическим секторам, что является возможным в течение ближайшего ограниченного периода времени. В целом, ГИМС/СКБО позволяет оценить динамику глобальной человеческой популяции при определенных допущениях. Рассмотрим некоторые из них. На рис. 10 представлены такие оценки в рамках следующих предположений (сценарий SP - научный прогресс):

- проблемы, возникшие из-за ограниченности источников энергии, будут преодолены до 2050 года;

- выбросы парниковых газов увеличатся на 10% к 2050 году по сравнению с 2015 годом, а затем начнут равномерно сокращаться к 2200 году до 5%;
- сельскохозяйственные технологии повысят производительность на 100% к 2050 году и на 200% к концу 22-го столетия;
- скорость замещения лесных экосистем пахотной землей снижается в 10 раз до 2050 года по сравнению с 2015 годом, и далее лесные пиксели не нарушаются;
- вклад ресурсов Мирового океана в производство продуктов питания увеличится с 1% в 2015 году до 5% в 2050 году, а затем он будет равномерно расти до 10% в 2200 году.

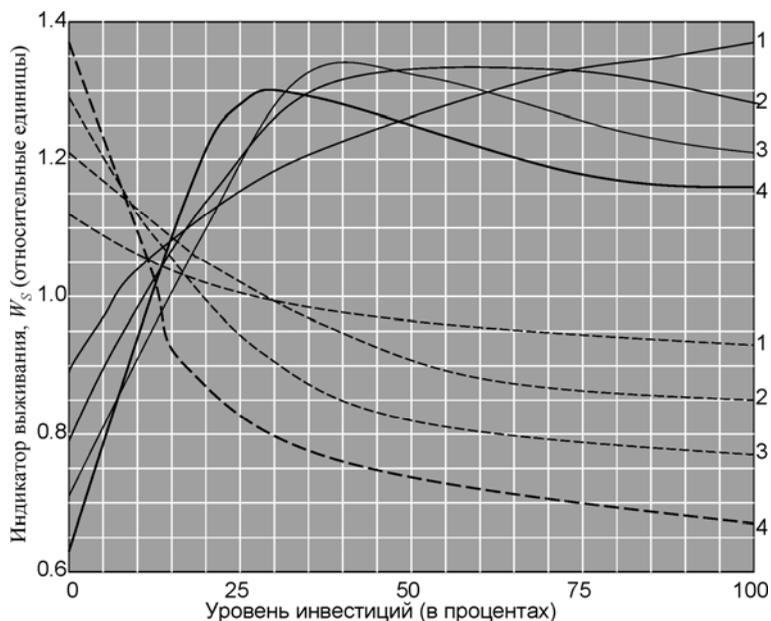


Рис. 9. Показатель выживаемости СКБО ($W_s = J(t)/J(t^*)$) в зависимости от распределения ВВП между сельским хозяйством (сплошные линии) и промышленностью (пунктирные линии). Цифры, расположенные справа от кривых, показывают периоды времени для инвестиций: 1-25 лет, 2 - 50 лет, 3 - 75 лет и 4 - 100 лет.

Как следует из результатов рис. 10, численность населения может достигать 14.9 млрд. к началу 23-го столетия с тенденцией незначительного роста. Распределение населения по регионам изменится в сторону увеличения на 6.9% в части развивающихся стран. Вклады регионов Ξ_{LD} и Ξ_{LM} в прирост населения сократятся на 2.1% и 4.8% соответственно. Эти изменения связаны с различными показателями рождаемости и смертности в уравнениях (6) и (7) в зависимости от состояния сообщества и продовольственного обеспечения, а также климатических параметров. На рис. 11 показаны некоторые из этих характеристик в их динамике до 2215 года. Видно, что априорные предположения относительно динамики различных антропогенных воздействий на окружающую среду играют существенную роль в динамике всех компонентов СКПО. К сожалению, эти предположения реализуются только как конкретные сценарии.

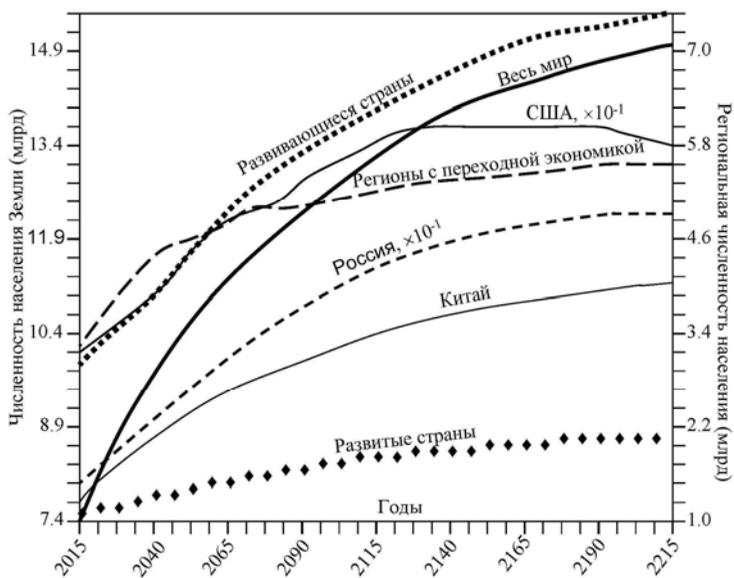


Рис. 10. Глобальная и региональная динамика населения.

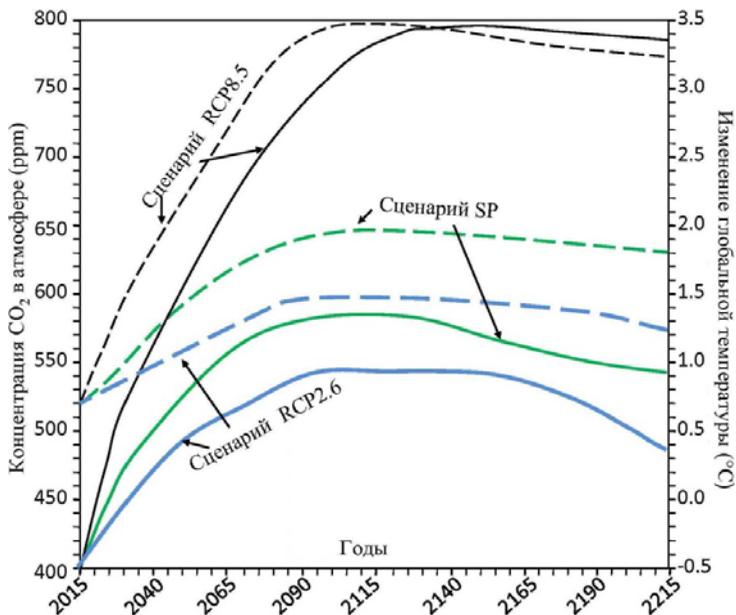


Рис. 11. Динамика климатических факторов (концентрация CO₂ и температура атмосферы представлены сплошной и пунктирной линиями соответственно). Сравнение реализации сценария SP с результатами сценариев RCP8.5 и RCP2.6 [58,67].

Реализация сценария RCP8.5 (сценарий сравнительно высоких выбросов парниковых газов [42]) приводит к увеличению концентрации CO_2 до 800 ppm к началу 23-го столетия с достижением максимального повышения температуры поверхности почти на 3°C . С другой стороны, достаточно реалистичный сценарий RCP2.6 (допускающий возможность сохранения увеличения средней глобальной температуры ниже 2°C [71]) приводит к соответствующим уровням 520 ppm для CO_2 и 0.8°C к изменению температуры до середины 22-го столетия с последующим снижением этих уровней. Поэтому наиболее точный прогноз требует детального анализа экспертами существующих тенденций в социально-экономическом развитии разных регионов и соответствующего уточнения возможных сценариев. Тем не менее, даже эти гипотетические сценарии дают информацию для размышления о возможных безопасных путях развития человечества, когда выживаемость сохраняется в течение длительного времени.

На рис. 12 показана динамика существенных факторов, формирующих эволюционный процесс развития общества. Коэффициенты рождаемости μ_B для регионов Ξ_{LD} , Ξ_{LM} и Ξ_{LG} изменяются с 0.0115, 0.0177 и 0.0267 в 2015 году до 0.005, 0.0098 и 0.0191 в 2200 году, соответственно. При этом коэффициенты рождаемости в регионах Ξ_{LD} и Ξ_{LM} будут равномерно уменьшаться к тому времени, когда коэффициент рождаемости достигнет максимального значения 0.034 в регионе Ξ_{LG} к 2060 году и после этого будет уменьшаться. Коэффициенты смертности μ_d аналогичным образом изменяются в регионах Ξ_{LD} , Ξ_{LM} и Ξ_{LG} с 0.0107, 0.0138 и 0.0175 в 2015 году до 0.0121, 0.0153 и 0.0211 в 2200 году, соответственно.

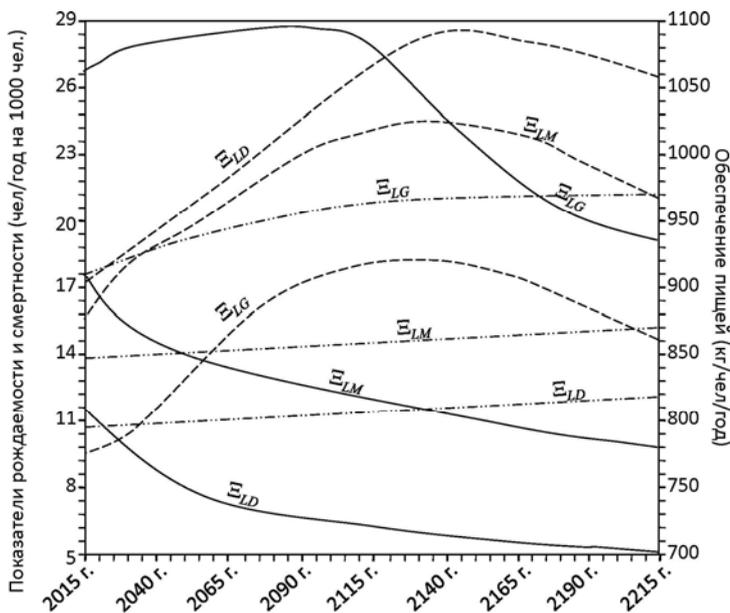


Рис. 12. Динамика жизненно важных факторов (кривые - обеспечение продовольствием по регионам, рождаемость и смертность представлены пунктирной, сплошной и штрих-пунктирной линиями, соответственно). Региональные идентификаторы размещены на кривых.

Выводы и обсуждение результатов

Предлагаемая версия глобальной геоэкологической информационно-моделирующей системы предоставляет инструменты для изучения и оценки последствий антропогенных воздействий на биосферу и позволяет понять ее реакции и определить допустимую зону для потенциальной активности человека. При этом ГИМС/СКБО дает возможность обнаруживать региональные экологические реакции на воздействия, находящиеся в пределах ограниченного числа пространственных пикселей. Несомненно, ГИМС/СКБО отражает ограниченный спектр обратных связей в СКБО с акцентом на экологические взаимодействия. ГИМС/СКБО позволяет модернизировать свою структуру с помощью дополнительных блоков, которые параметризуют социально-экономические и биотические обратные связи в глобальной климатической системе.

Модель глобальных экологических процессов, основанная на ГИМС-технологии, принципиально отличается от других глобальных моделей возможностью эволюционной адаптации к предьстории с использованием информационных индикаторов для оценки состояния СКБО. Безусловно, процесс адаптации и выбор информативных показателей нуждаются в дополнительных исследованиях.

Результаты этого исследования показывают, что проблема выживаемости будет в течение следующих двух столетий не критичной в зависимости от роста населения. Это возможно в рамках взвешенных решений, касающихся воздействия на биосферные процессы, в том числе за счет изменения классов лесов, загрязнения гидросферы и дисбаланса в ограниченных масштабах. Ограниченная доступность ресурсов для производства продуктов питания возникает в конце XXI столетия, когда, как следует из рис. 12, глобальная чистая продукция медленно сокращается из-за изменения климата и изменений в региональных гидрологических балансах. В частности, повышение температуры в тропических широтах вызывает снижение содержания воды в почве из-за испарения, что приводит к снижению чистой первичной продукции. Напротив, в северных пикселях повышение температуры приводит к удлинению вегетационного периода примерно на 16-20 дней в 22 столетии, начиная с роста чистой первичной продукции на 9-12%. Эти отрицательные и положительные обратные связи неравномерно распределены по пространственным пикселям. В результате динамика производства продуктов питания, представленная на рис.12, показывает, что вывоз избыточных запасов продовольствия из региона Ξ_{LG} в другие регионы возможен только до конца 21-го столетия после того, как население увеличит эффективность таких стратегий, как расширение земельной площади, используемой для сельского хозяйства, расширение рыболовства и повышение производительности сельского хозяйства. Текущие тенденции роста численности населения в регионе показывают, что будущее удовлетворение потребностей в продовольствии вряд ли будет реализовано, если человеческое общество не будет искать устойчивых взаимодействий с природой. Осуществленные здесь оценки производства продуктов питания являются приблизительными, и они могут быть более точными, когда учитываемая пространственная структура суши и океанов будет, например, $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ или меньше. Известно, что вариации чистой первичной продукции в океане изменяются от $1800 \text{ г/м}^2/\text{год}$ в устьях до $50 \text{ г/м}^2/\text{год}$ в открытом океане. Вариации биомассы и продуктивности биомасс наземной растительности также имеют широкий спектр. Это обстоятельство является дополнительным резервом для уточнения результатов глобальной модели. Разумеется, модель ГИМС/СКБО позволяет бо-

лее детально описать почвенно-растительные формации, представленные в табл. 2 и на рис.2, с учетом существующих вариаций их площадей и продуктивности, а также отразить специфику сельскохозяйственных экосистем. Необходимо дополнительное расширение и уточнение глобальных и региональных экологических баз данных.

Литература (References)

1. Alexandratos N., Bruinsma J. World agriculture forwards 2030/2050. FAO, 2012. Rome, Italy, 147 pp.
2. Anderson B.A. World population dynamics: An introduction to demography. Pearson Publ. Ltd., 2015. Cambridge, 544 pp.
3. Berthelot M., Friedlingstein P., Ciais P., Monfray P. Global response of the terrestrial biosphere to CO₂ and climate change using a coupled climate-carbon cycle model. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002. 16(4), 31-1 – 31-16.
4. Burford M.A., Rothlisberg P.C. Factors limiting phytoplankton production in a tropical continental shelf ecosystem estuarine. *Coastal and Shelf Science*, 1999. 48(5), 541-549.
5. Butler J.H., Montzka S.A. The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI). NOAA Earth System Research Laboratory, 2016. Boulder, <http://www.erst.noaa.gov/gmd/aggi.html>.
6. Card D., Raphael S. Immigration, poverty, and socioeconomic inequality. Russel Sage Foundation, 2013. New York, 484 pp.
7. Cimbala S.J. Nuclear weapons in the information age. Continuum International Publishing Group, 2012. London, 233 pp.
8. Coupel P., Ruiz-Pino D., Sicre M.A., Chen J.F., Lee S.H., Schiffrine N., Li H.L., Gascard J.C. The impact of freshening on phytoplankton production in the Pacific Arctic Ocean. *Progress in Oceanography*, 2015. 131, 113–125.
9. Dao Van Tuyet, Nguyen Xuan Man, Le Thi Thuy Van, Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A., Nguyen Thanh Hung, Le Ngoc Thanh. Global model of carbon cycle as instrument of primary agriculture production assessment. Proceedings of the International Symposium “Some Aspects of Contemporary Issues in Ecoinformatics”, 20th March 2015, Hochiminh City, Vietnam. Institute of Applied Mechanics and Informatics, Vietnam Academy of Science and Technology, Hochiminh City, 50-58.
10. Daun H. (ed.) School decentralization in the context of globalizing governance. International comparison of grassroots responses. Springer, 2007. Dordrecht, The Netherlands, 240 pp.
11. Debertin D.L. Agricultural production economics. Macmillan Publishing Company, 2012. London, 428 pp.
12. Degermendzhi A.G. New directions in biophysical ecology. In: A.P. Cracknell, V.F. Krapivin, C.A. Varotsos (Eds.). *Global Climatology and Ecodynamics*. Springer/Praxis, Chichester, 2009, 379-396.
13. Degermendzhi A.G., Bartsev S.I., Gubanov V.G., Erokhin D.V., Shevirnogov A.P. Forecast of biosphere dynamics using small-scale models. In: A.P. Cracknell, V.F. Krapivin, and C.A. Varotsos (Eds.). *Global Climatology and Ecodynamics*. Springer/Praxis, Chichester, 2009, 241-300.
14. Dixon A.P., Faber-Langendoen D., Josse C., Morrison J., Loucks C.J. Distribution mapping of world grassland types. *Journal of Biogeography*, 2014. 41(11), 2003-2019.

15. Dufresne J.-L., Foujols M.-A., Denvil S., Caubel A., Marti O. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 2013. 40(9), 2123–2165.
16. Forrester, J.W. *World dynamics*. Wright - Allen Press, 1971. Cambridge. Massachusetts, 144 pp.
17. Forrester J.W. *World dynamics*. Productivity Press Publishing, 1979. New York, 142 pp.
18. Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 2015. 10(A), 4-10.
19. Kaduk J., Heimann M. A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models. *Climate Research*, 1996. 6, 1-19.
20. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Phillips G.W. *Global environmental change: Modelling and monitoring*. Springer-Verlag, 2002. Berlin, 319 pp.
21. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Phillips G.W. High latitude environmental pollution problems. *Cankt-Petersburg State University Publ.*, 2002. Sankt-Petersburg, 279 pp.
22. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Phillips G.W. Arctic Basin pollution dynamics. In: L.P. Bobylev, K.Ya. Kondratyev, O.M. Johanneses (Eds.). *Arctic Environment Variability in the Context of Global Change*. Springer/Praxis, 2003. Chichester, U.K., 2003, 309-362.
23. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A. *Global carbon cycle and climate change*. Springer/PRAXIS, 2003. Chichester, U.K., 372 pp.
24. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P., Varotsos C.A. *Global ecodynamics: A multidimensional analysis*. Springer/PRAXIS, 2004. Chichester U.K., 658 pp.
25. Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. *Atmospheric aerosol properties: Formation, processes and impacts*. Springer/PRAXIS, 2006. Chichester, U.K., 572 p.
26. Korotaev A., Zinkina J. On the structure of the present-day convergence. *Campus-Wide Information Systems*, 2014. 31(2/3), 139-152.
27. Krapivin V.F. Mathematical model for global ecological investigations. *Ecological Modelling*, 1993. 67(2-4), 103-127.
28. Krapivin V.F. The estimation of the Peruvian current ecosystem by a mathematical model of biosphere. *Ecological Modelling*, 1996. 91: 1-14.
29. Krapivin V.F., Kelley J.J. Model-based method for the assessment of global change in a nature-society system. In: A.P.Cracknell, V.F.Krapivin, and C.A.Varotsos (eds). *Problems of Global Climatology and Ecodynamics*, Springer/Praxis, Chichester, U.K., 2009, pp. 133-184.
30. Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A. Nature-society system survivability indicators. *Journal Science and Technology Binh Duong University*, 2019. No.1 pp. 1-10.
31. Krapivin V.F., Shutko A.M. *Information technologies for remote monitoring of the environment*. Springer/Praxis, 2012. Chichester U.K., 498 pp.
32. Krapivin V.F., Varotsos C.A. *Globalization and sustainable development*. Springer/Praxis, 2007. Chichester, U.K.. 304 p.
33. Krapivin V.F., Varotsos C.A. *Biogeochemical cycles in globalization and sustainable development*. Springer/Praxis, 2008. Chichester, U.K., 562 p.
34. Krapivin V.F., Varotsos C.A. Modelling the CO₂ atmosphere-ocean flux in the upwelling zones using radiative transfer tools. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016. 150-151: 47-54.

35. Krapivin V.F., Vilokova L.P. Model estimation of excess CO₂ distribution in biosphere structure. *Ecological Modelling*, 1990. 50(1-3): 57-78.
36. Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A., Tuyet Dao Van. Constructive method for the vegetation microwave monitoring. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Ecology*, 2-4 December 2015, Moscow. The Russian Sciences Engineering A.S. Popov Society for Radio, Electronics and Communication, Moscow, pp. 21-27.
37. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu.. *New ecoinformatics tools in environmental science: Applications and decision-making*. Springer, 2015. London, U.K., 903 pp.
38. Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A., Nazaryan N.A. Development of GIMS-technology for environmental monitoring of ocean ecosystems. *Proceedings of the 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*, 21-24 February 2016, Mombetsu, Hokkaido, Japan. The Okhotsk Sea & Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp. 116-119.
39. Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A., Soldatov V.Yu. Simulation model of the Arctic Basin ecosystem. *Proceedings of the 32nd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans*, 19-22 February 2017, Okhotsk Sea and Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp. 337-340.
40. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. Simulation results from a coupled model of carbon dioxide and methane global cycles. *Ecological Modelling*, 2017. 359, 69-79.
41. Krapivin V.F., Nitu C., Varotsos C.A. *Remote sensing tools and ecoinformatics*. Matrix Rom, 2019. Bucharest, Romania, 332 pp.
42. Li J., Mao J. Changes in the boreal summer intraseasonal oscillation projected by the CNRM-CM5 model under the RCP 8.5 scenario. *Climate Dynamics*, 2016. 47(12): 3713-3736.
43. Lucas J.S., Southgate P.C. *Aquaculture : Farming aquatic animals and plants*. John Wiley and Sons, 2012. New York, 648 pp.
44. Mayhew R.J. (ed.) *New perspectives on Malthus*. Cambridge University Press, 2016. Cambridge, 330 pp.
45. Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W. *The limits to growth*. Universe Books, 1972. New York, 205 pp.
46. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. *Limits of grows: the 30-years update*. Chelsea Green Publishing, 2004. Vermont, 338 pp.
47. Mintzer I.M. *A matter of degrees: the potential for controlling the greenhouse effect*. World Resources Institute, Washington, 1987. 60(8): 1-60.
48. Mkrtchyan F.A., Krapivin V.F., Shapovalov S. About biocomplexity model of marine ecosystems. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018*. 18-21 February 2018. Mombetsu, Hokkaido, Japan. Okhotsk Sea and Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2018, pp. 287-290.
49. Mkrtchyan F.A. Krapivin V.F., Shapovalov S.M. About capabilities of GIMS-technology to the study of the marine ecosystems. *Abstracts of the Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2019)*, Rome, Italy, 17–20 June, 2019, P. 2430.
50. Moiseev N.N., Aleksandrov V.V., Krapivin V.F., Lotov A.V., Svirezhev Y.M., Tarko A.M. *Global models, the biospheric approach (theory of the noosphere)*, IIASA Collaborative Paper CP-83-033, 1983. IIASA, Laxemburg, Austria, 50 pp.

51. Nitu C., Krapivin V.F., Pruteanu E. *Ecoinformatics: Intelligent systems in ecology*. Magic Print Onesti, 2004. Bucharest, Rumania, 411 pp.

52. Nitu C., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. *Information-modeling technology for environmental investigations*. Matrix Rom, 2013. Bucharest, Romania, 621 pp.

53. Nitu C., Dumitrasku A., Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A. Reducing risks in agriculture. *Proceedings of the 20th International Conference on Control Systems and Computer Science*, 27-29 May 2015, Bucharest, Romania. Bucharest: University Politehnica of Bucharest Campus, 941-945.

54. Okazaki K. *Good-bye incurable diseases!* iUniverse, Inc., 2011. Bloomington, USA, 80 pp.

55. Pawłowski A. *Sustainable development as a civilizational revolution. A multidisciplinary approach to the challenges of the 21st century*. CRC Press, 2011. New York, 230 pp.

56. Pestel E. *Beyond the limits to growth: a report to Club of Rome*. Universe Books, 1989. New York, 191 pp.

57. Raymont J.E.G. *Plankton and productivity in the oceans*. Vol. 1: Phytoplankton. Pergamon Press, 1980. New York, 504 pp.

58. Riahi K., Krey V., Rao S., Chirkov V., Fischer G., Kolp P., Kindermann G., Nakicenovic N., Rafai P. RCP-8.5: exploring the consequence of high emission trajectories. *Climatic Change*. 2011. 109(33), doi: 10.1007/s10584-011-0149-y.

59. Saavedra-Rivano N. A critical analysis of the Mesarovic-Pestel world model. *Applied Mathematical Modelling*, 1979. 3(5): 384-390.

60. Sahib S.S. Impact of mobile phones on the density of honeybees. *Journal of Public Administration and Policy Research*, 2011. 3(4): 131-117.

61. Sellers P.J., Los S.O., Tucker C.J., Justice C.O., Dazlich D.A., Collatz G.J., Randall D.A. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, 1996. 9(4): 708-737.

62. Shaw P. *A treatise of incurable diseases*. BiblioBazaar Publ., 2010. Carolina, USA, 50 pp.

63. Shirasawa K., Krapivin V.F., Mkrtychyan F.A., Kelley J.J. Biocomplexity problem related to the Okhotsk Sea fisheries. *Proceedings of the IX International Symposium «Engineering Ecology - 2017»*. Moscow, 5 – 7 December, 2017, The Moscow Sciences Engineering A.S. Popov Society for Radio, Electronics and Communication, Moscow, 2017, pp.75-79.

64. Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.C., Nilsson S., Buluy Yu.I. *Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia*. Federal Agency of Forest Management, 2008. 883 pp.

65. Svirezhev Yu.M., Krapivin V.F., Tarko A.M. Modelling the main biosphere cycles. In: T.F. Malone and J.G. Roederer (eds.) *Global Change*. ICSU Press, 1984. Ottawa, pp. 171-186.

66. Tarko A.M. Analysis of global and regional changes in biogeochemical carbon cycle: A spatially distributed model. IIASA, Interim Report, IR-03-041, 2003. Laxenburg, Austria, 28 pp.

67. Van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G.J., Kram T., van Vliet J., Deetman S., Isaac M., Goldewijk K.K., Hof A., Beltran A.M., Oostenrijk R., van Ruijven D. *Climatic Change*, 2011. 109(95), doi:10.1007/s10584-011-0152-3.

68. Varotsos C.A., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Modeling the carbon and nitrogen cycles. *Frontiers in Environmental Science: Air Pollution*, 2014. 2(8): doi:10.3389/fenvs.2014.00008.
69. Varotsos C.A., Nitu C., Krapivin V.F. *Global ecoinformatics: Theory and applications*. Matrix Rom, 2018, Bucharest, Romania, 351 pp.
70. Vernadsky W.I. *The biosphere and the noosphere*. *American Scientist*, 1945. 33(1): 1-12
71. Wayne G.P. *The beginner's guide to representative concentration pathways*. *Sceptical Science*, 2013. 24 pp. (http://denning.atmos.colostate.edu/ats760/Readings/RCP_Guide.pdf).
72. Weart S.R. *The discovery of global warming*. Harvard University Press, 2008. Harvard, 200 pp.
73. Xue Y., Sellers P.J., Kinter J.L., Shukla J. A simplified biosphere model for global climate studies. *Journal of Climate*, American Meteorological Society, 1991. 4: 345-364.