

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 502/504 : 001

КОНСТРУКТИВНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ КЛИМАТ-ПРИРОДА-ОБЩЕСТВО

Д-р физ.-мат. наук, проф. **В.Ф. Крапивин**, канд. физ.-мат. наук **В.Ю. Солдатов**
(Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН)
канд. техн. наук **И.И. Потапов**
(Всероссийский институт научной и технической информации, г. Москва)

CONSTRUCTIVE APPROACH TO THE MODELING OF CLIMATE-NATURE-SOCIETY SYSTEM

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

Ключевые слова: климат, биосфера, общество, модель, выживание, критерий, биологическая сложность, океан, почвенно-растительная формация.

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

Предложен конструктивный подход к глобальному моделированию процессов в системе климат-природа-общество, основанный на информационной технологии адаптивного согласования параметрического и функционального пространства глобальной модели. Представлена блок-схема глобальной модели системы климат-природа-общество и охарактеризованы функциональные возможности ее блоков. В качестве критерия выживания человечества выбран показатель живучести, определяющий направленность динамики суммарной биомассы биосферы с учетом тенденций изменения биологической сложности наземных и гидросферных экосистем. На конкретных примерах продемонстрированы возможности глобальной модели. Рассмотрена классификация наземных экосистем с выделением 30 типов почвенно-растительных формаций по географической сетке пикселей $4^\circ \times 5^\circ$. Человеческое сообщество представлено тремя традиционными группами экономического развития. Мировой океан параметризуется тремя широтными зонами. Результаты моделирования динамики развития системы климат-природа-общество до начала 23-го столетия показали, что численность населения планеты может достичь уровня 14 млрд без появления катастрофических процессов. Данная работа выполнена по Госзаданию № 0030-2019-0008.

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. 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 hydrosphere 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 dynamics to the beginning of the 23st century: world population can reach the level of 14 billions without the occurrence of negative processes.

Введение

Начало 21-го столетия практически не ослабило, а наоборот обострило, проблему устойчивого развития человечества. Если в середине 20-го столетия в период так называемого Карибского кризиса человечество стояло на пороге ядерной войны, то сейчас глобальная система климат-природа-общество находится в состоянии стогнации по ряду причин, среди которых наиболее значимыми являются:

- Опережающий рост глобальной численности населения по сравнению с возрастанием продуктивности природных и сельскохозяйственных экосистем, в результате чего количество пищи на одного человека уменьшается. По различным источникам в мире недоедает и голодает более 0.5 миллиарда человек.

- Реакция природной среды на антропогенные вмешательства в природные циклы сопровождается нарастанием катастрофических процессов, включая появление новых неизлечимых в ближайшем будущем болезней, таких как лихорадка Эбола и СПИД,

- Изменение глобального климата в связи с нарушением круговорота парниковых газов и водных ресурсов, что приводит к изменению пространственного распределения, например, питьевой воды.

- Создание новых мощных видов вооружений и средств их оперативной доставки практически в любую точку земного шара с возможными искажениями информационной среды, что может способствовать их неограниченному распространению и применению.

- Нарастание темпов зарождения международных и региональных конфликтов как причина резкого изменения соотношений сил на мировой арене, сопровождаемого ускорением процесса глобализации и одновременной децентрализацией.

Таким образом, перед человечеством встала более обостренная проблема выживания, решение которой невозможно на региональных уровнях без формирования общей картины мира, допускающей конструктивный поиск стратегий устойчивого развития всей глобальной системы климат-природа-общество (СКПО). Существуют и обсуждаются различные подходы к решению этой проблемы, варьируемые между различными моделями мироустройства. Безусловно, сложно воспроизвести и объединить многие виртуальные модели, основанные на философско-мировоззренческой конструкции мира. В какой-то мере впервые в работах Моисеева [19,20] был найден конструктивный подход к постановке и решению проблемы глобальной устойчивости СКПО. Последующие работы позволили достаточно четко определить роль математического моделирования в попытках найти устойчивые стратегии для человечества и, что особенно важно, оценить последствия реализации гипотетических крупномасштабных антропогенных проектов, включая реконструкцию земных покровов, загрязнение атмосферы и гидросферы [10].

Концептуальная модель биосферы, сформулированная в работах [10,13] принципиально отличающаяся от взглядов работ Римского клуба выраженных в работах Форрестера [2,6,7], Медуза [23,24] и Пестеля [32]. Это отличие находится в методических установках:

- авторы Римского клуба главное внимание сосредотачивали на исследовании глобального экономического процесса, связывая его с отдельными элементами экологической ситуации на планете и выделяя в качестве главного объекта демографический блок;

- отправная позиция работы [13] состояла в изучении собственно биосферы, где человек является лишь элементом, а демографические и экономические процессы должны рассматриваться только в рамках систематического анализа эволюции экологической ситуации.

В какой-то степени современные социально-экономические теории устойчивого развития далеки от идей и тем более от учения Вернадского [40] о ноосфере. Многочисленные индикаторы типа индекса «счастливая планета» (HPI- Happy Planet Index), индекс развития человечества (HDI – Human development Index), показатель производства пищи (FPI - Food Production Index), валовый внутренний продукт (GDP – Gross Domestic Product) и многие другие, безусловно, помогают оценить тенденции в развитии одного из многочисленных сечений СКПО, но затрудняют сделать комплексную оценку эволюции этой системы. Это возможно только в рамках глобальной модели, позволяющей учесть максимальное количество прямых и обратных связей в СКПО.

Стремление к совершенствованию глобальных моделей характеризуется попытками повысить их точность и уменьшить требования к информационному обеспечению. Сложно организованная реальность вместе с тем препятствует этому стремлению к совершенствованию и выдвигает целый комплекс ограничений, связанных с наличием хаотических процессов в окружающей среде и проблемой многомерности. В последнее время это стало аксиомой для многих исследователей глобального мира [3,4].

В данной работе с учетом ранее опубликованных моделей глобальных процессов в СКПО предлагается геоэкологическая информационно-моделирующая система (ГИМС), ориентированная на комплексную параметризацию наиболее важных глобальных процессов с целью поиска устойчивого состояния во взаимодействии человека и природы. Исходя из современного круга представлений, традиционных и цивилизованных восприятий процессов в СКПО конструируется блочная структура глобальной модели демонстрирующая целостную картину прямых и обратных связей между этими процессами.

Общее описание геоэкологической информационно-моделирующей системы (ГИМС)

Ключевым моментом оценки выживаемости человеческого общества является экологическая ситуация на Земле, от состояния естественной эволюции которой зависит объем добываемой пищи и других условий проживания человека. Безусловно, уровень самоорганизации и самоструктурирования системы климат-природа-общество зависит от многих факторов коэволюции природы и человека, как элементов биосферы. Поэтому создание модели такой системы возможно только на основе синергетического подхода, который диктует форму и структуру ГИМС. Следуя этому подходу, определим базовые элементы модели глобальной системы, учет которых возможен за счет наличия необходимой информации об

экологических, геофизических, гидрологических, биоценологических и демографических процессах в различных регионах земного шара.

Выделим на поверхности Земли Ξ две зоны, принадлежащие суше Ξ_L и Мировому океану Ξ_O ($\Xi = \Xi_L \cup \Xi_O$). Покроем поверхность суши Ξ_L географической сеткой $\{\varphi_i, \lambda_j\}$ с шагами дискретизации $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\lambda_j$ по широте и долготе соответственно, так что внутри пикселя поверхности суши $\Xi_{Lij} = \{(\varphi, \lambda): \varphi_i \leq \varphi \leq \varphi_i + \Delta\varphi_i; \lambda_j \leq \lambda \leq \lambda_j + \Delta\lambda_j\}$ все процессы и элементы считаются однородными и параметризуются точечными моделями. На поверхности суши площадь каждого пикселя $\sigma_{ij} = s n \Delta\varphi_i \Delta\lambda_j$ может занимать почвенно-растительная формация (k -я часть), сельскохозяйственная растительность (r -ая часть), антропогенный объект (θ -ая часть) и гидрофизический объект, где s (≈ 111 км) и n ($= 111.3 \cos\varphi$) – количество километров в одном градусе широты и долготы, соответственно.

В случае Мирового океана выделяются три широтные зоны: экваториальный пояс $\Xi_{OE} = \{(\varphi, \lambda): \varphi \in [5^\circ, 8^\circ \text{ с.ш.}] \cup [4^\circ, 11^\circ \text{ ю.ш.}]; 0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ\}$, умеренные широты $\Xi_{OT} = \{(\varphi, \lambda): \varphi \in [40^\circ, 65^\circ \text{ с.ш.}] \cup [42^\circ, 58^\circ \text{ ю.ш.}]; 0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ\}$ и зона арктических и антарктических широт $\Xi_{OA} = \{(\varphi, \lambda): \varphi \in [65^\circ, 90^\circ \text{ с.ш.}] \cup [58^\circ, 90^\circ \text{ ю.ш.}]; 0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ\}$. В зоне Ξ_{OE} выделяются пелагические Ξ_{OEP} и апвеллинговые Ξ_{OEU} акватории, отличающиеся продуктивностью и скоростью газового обмена на границе атмосферы и воды.

Рис. 1 и табл. 1 представляют блочную структуру ГИМС, построенную с учетом компонентов и параметров глобальной биогеосистемы Земли, контроль которых осуществляется системами геоинформационного мониторинга. Характер пространственной структуры ГИМС несомненно определяется базой данных. Самый простейший вариант точечной модели реализуется при задании исходной информации в форме усреднения по поверхности суши и всей акватории Мирового океана. Учет пространственной неоднородности обеспечивается разнообразными формами дискретизации пространства. Базовой формой пространственного деления суши и океанов является задание равномерной сетки $\Delta\varphi \times \Delta\lambda$. Реализация реального варианта использования модели обеспечивается интегрированием пикселей Ξ_{Lij} так, что в каждом блоке могут присутствовать различные формы пространственной структуры учитываемых элементов и процессов биосферы. Такая гибкость задания пространственной структуры биосферы дает возможность легко адаптировать модель к неоднородностям в базах данных и осуществлять имитационные эксперименты с актуализацией отдельных регионов.

В зависимости от специфики рассматриваемого природного процесса структура регионального деления может быть идентифицирована с климатическими зонами, континентами, широтными поясами, социально-административной структурой и природными зонами. Так для климатических процессов многие исследователи ориентируются на регионы с размерами $\Delta\varphi = 4^\circ$ и $\Delta\lambda = 5^\circ$ [22], биогеоценологические процессы изучаются при $\Delta\varphi = \Delta\lambda = 0.5^\circ$ [35], социально-экономическая структура представляется девятью регионами [13], атмосферные процессы в биогеохимических циклах долго живущих элементов аппроксимируются точечными моделями [26-29], функционирование океанских экосистем описывается неоднородной структурой пространственной дискретизации шельфовой зоны на пиксели Ξ_{Oij} с выделением четырех частей пелагиали Мирового океана. Тарко [37] в Московской глобальной модели биосферы для параметризации акваторий Мирового океана выделил в северном и южном полушариях отдельно верхние квазиоднородные и глубинные слои с их дискретизацией на четыре широтные зоны.

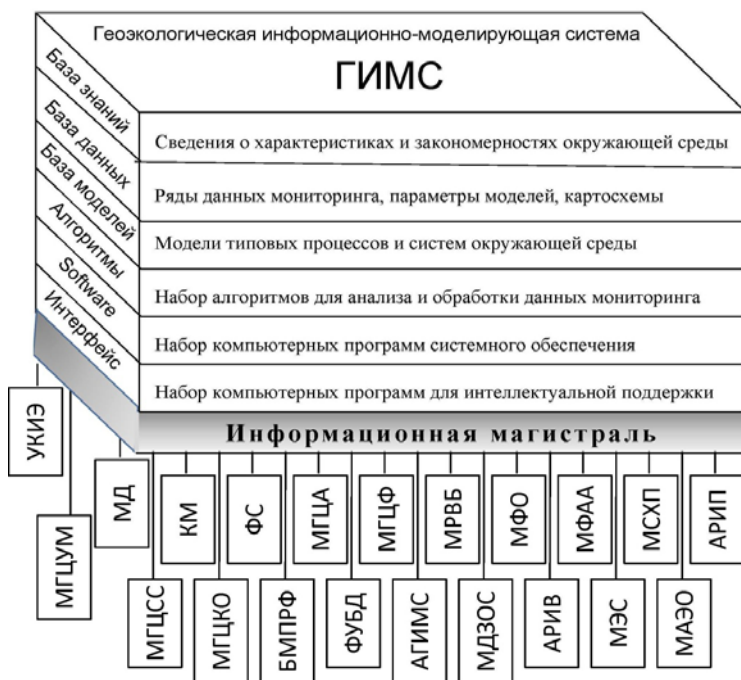


Рис. 1. Блок-схема ГИМС. Расшифровка наименований блоков ГИМС дана в табл. 1.

Таблица 1

Функциональные блоки ГИМС

Блок	Функции блока
МД	Модель демографии [11].
КМ	Климатическая модель [21,625].
МКЦУМ	Модель глобального цикла углекислого газа и метана [19,20,22].
МКЦСС	Модель глобального цикла соединений серы [21].
МКЦКО	Модель глобального цикла кислорода и озона [17].
МКЦА	Модель глобального цикла азота [16,17].
МКЦФ	Модель глобального цикла фосфора [17].
МРВБ	Модель регионального водного баланса [29].
БМПРФ	Биоценоотическая модель почвенно-растительной формации [10,11].
МФО	Модель фотосинтеза в тропическом и умеренном секторах океанов [21,37].
МФАА	Модель фотосинтеза в арктических и антарктических зонах Мирового океана [10,12].
МСХП	Модель сельскохозяйственного производства [2,26,30].
АРИП	Алгоритм расчета индикатора произведенной в биосфере пищи [38].
МАЭО	Модель апвеллинговой экосистемы океана [17].
МЭС	Модель типовой водной экосистемы суши [16].
АРИВ	Алгоритм расчета индикатора выживания населения [21].
МДЗОС	Модель динамики загрязнителей окружающей среды [9].
АГИМС	Адаптация структуры ГИМС к условиям имитационного эксперимента [16].
ФУБД	Формирование и управление базой данных.
ФС	Формирование сценариев взаимодействия общества с природной средой [21].
УКИЭ	Управление и контроль имитационного эксперимента [27].

Характеристика блоков ГИМС

Блоки ГИМС, перечисленные в табл. 1, реализуют расчет потоков энергии и вещества между пикселями пространственной дискретизации биосферы с учетом ее элементов, указанных на рис. 2. Для придания структуре ГИМС устойчивости все блоки связаны между собой через информационную магистраль так, что замена или модификация любого блока не может воздействовать на любой другой блок. Блок АГИМС обеспечивает символично-параметрическую идентификацию элементного состава пространственных пикселей в соответствии с исходными данными о распределении почвенно-растительных формаций, источников загрязнения природной среды, водных экосистем и численности населения. В компьютерной версии ГИМС формируются матричные структуры, которые в символическом пространстве представляют систему климат-природа-общество.

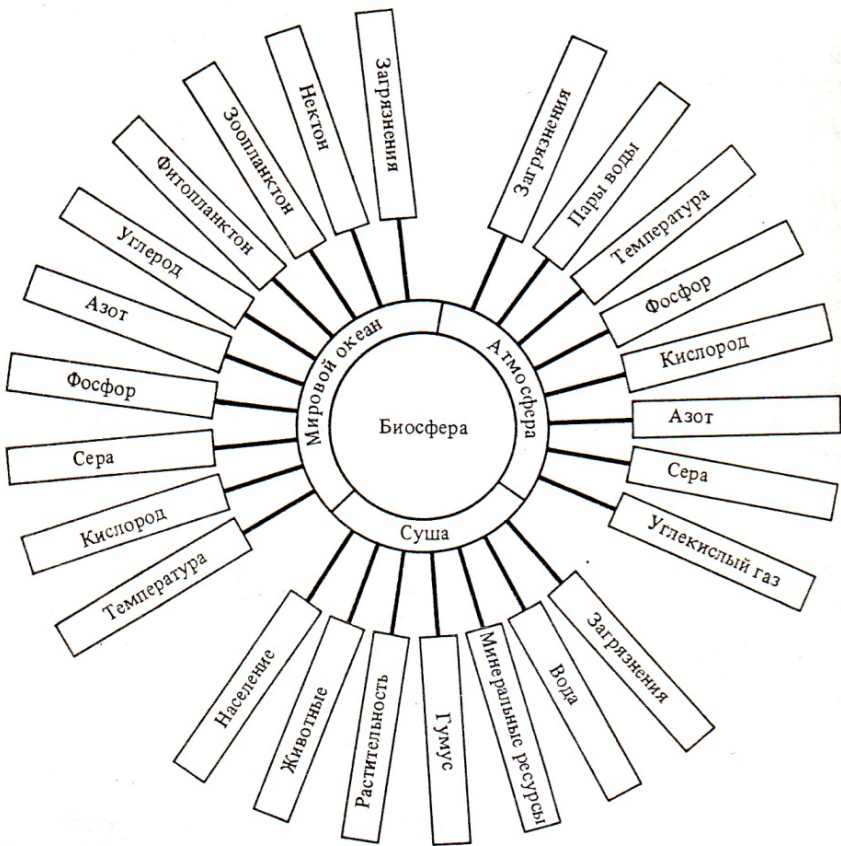


Рис. 2. Компонентный состав ГИМС

Блок АРИВ решает задачу оценки уровня выживания человеческого общества, что, безусловно, является сложной функцией множества факторов окружающей среды. Одним из таких индикаторов может выступать показатель биологической сложности биосферы и СКПО в целом. Формальное описание биологической сложности СКПО при выделении m подсистем сводится к регистрации взаимодействий между ними в форме матрицы $X = \left\| x_{ij} \right\|$, где $x_{ij}=0$ в случае отсутствия взаимодействий между подсистемами i и j и $x_{ij} \neq 0$ в противоположном случае. Тогда любая точка $W_N \in \Psi = [0,1]$ шкалы биологической сложности Ψ определяется как взвешенная сумма:

$$W_N(\varphi, \lambda, t) = \frac{2}{m(m+1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j \geq i}^m k_j x_{ij}, \quad (1)$$

где k_j коэффициент значимости j -ой подсистемы в обеспечении выживания населения.

Окончательно, индикатор выживания может быть сформирован на основе индикатора биологической сложности:

$$W_S(\varphi, \lambda, t) = \frac{\sum_{i=1}^m \iint_{(\varphi, \lambda) \in \Xi} W_{N_i}(\varphi, \lambda, t) d\varphi d\lambda}{\sum_{i=1}^m \iint_{(\varphi, \lambda) \in \Xi} W_{N_i}(\varphi, \lambda, t_0) d\varphi d\lambda}. \quad (2)$$

Таким образом, индикатор $W_N(\varphi, \lambda, t)$ выступает как интегральный показатель сложности СКПО, отражая индивидуальность ее структуры и поведения в каждый момент времени t в пространстве Ξ . В соответствии с законами естественной эволюции уменьшение (увеличение) величины W_N 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 не возобновляемые ресурсы, то бинарная структура матрицы X сдвигается в направлении усиления позиций ресурсо-истощающих технологий, и вектор энергетического обмена между подсистемами СКПО смещается в состояние, когда уровень ее выживаемости понижается.

Так или иначе, прямым следствием сокращения биоразнообразия является снижение суммарной массы продуктов питания, поэтому более чувствительным индикатором выживания населения может быть показатель производства продовольствия, который дополнительно может отражать влияние климата, научно-технического прогресса и экономического развития.

Блок КМ обеспечивает расчет пространственного распределения средней годовой температуры атмосферы на основе использования моделей Mintzer [25] и Сергина [36]: $\Delta T_{\Sigma} = \Delta T_{CO_2} + \Delta T_{N_2O} + \Delta T_{CH_4} + \Delta T_{O_3} + \Delta T_{CFC11} + \Delta T_{CFC12}$, $T(\varphi) = T_{\Xi} + \gamma(\sin^2 \varphi_T - \sin^2 \varphi)$, где γ - разность температур между полюсом и экватором, φ_T - широта, на которой $T(\varphi) = T_{\Xi}$.

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{CO}_2} &= -0.677 + 3.019 \ln[C_A(t)/C_A(t_0)], \\ \Delta T_{\text{N}_2\text{O}} &= 0.057[\text{N}_2\text{O}(t)^{1/2} - \text{N}_2\text{O}(t_0)^{1/2}], \\ \Delta T_{\text{CH}_4} &= 0.019[\text{CH}_4(t)^{1/2} - \text{CH}_4(t_0)^{1/2}], \\ \Delta T_{\text{O}_3} &= 0.7[\text{O}_3(t) - \text{O}_3(t_0)]/15, \\ \Delta T_{\text{CFC}_{11}} &= 0.14[\text{CFC}_{11}(t) - \text{CFC}_{11}(t_0)], \\ \Delta T_{\text{CFC}_{12}} &= 0.16[\text{CFC}_{12}(t) - \text{CFC}_{12}(t_0)]. \end{aligned}$$

Значение t_0 отождествляется с 1980 г., когда концентрации парниковых газов считаются известными. Блоки МГЦУМ, МГЦА и МГЦКО обеспечивают расчет $C_A(t)$, $\text{N}_2\text{O}(t)$, $\text{CH}_4(t)$ и $\text{O}_3(t)$.

Блок МД реализует модель динамики населения $G(\varphi, \lambda, t)$ с учетом влияния факторов окружающей среды:

$$dG(\varphi, \lambda, t)/dt = R_G(\varphi, \lambda, t) - M_G(\varphi, \lambda, t), \quad (4)$$

где R_G и M_G – показатели рождаемости и смертности, соответственно. Рождаемость и смертность зависят от обеспеченности пищей и ее качества, загрязненности окружающей среды, материального уровня жизни, энергообеспеченности, плотности населения, религиозных и других обстоятельств. Детальное описание этих зависимостей дано в [18]. Безусловно, совокупность этих факторов в конечном виде определяет состояние биологической сложности окружающей среды в каждом пикселе земной поверхности, которая окончательно определяет уровень обеспечения населения продуктами питания. В связи с этим выделяются три социально-экономические группы, занимающие соответствующие территории суши Ξ_L : Ξ_{LD} – развитые индустриальные страны ($\text{HDI} \in [0.85, 1]$), Ξ_{LM} – страны со средним уровнем развития (переходная экономика) ($\text{HDI} \in [0.65, 0.85]$) и Ξ_{LG} – развивающиеся страны ($\text{HDI} \in [0, 0.65]$). В каждой из этих групп влияние факторов окружающей среды на жизненный уровень населения проявляется в различной степени. Обеспеченность пищей складывается из доступных источников:

- Основным источником пищи является сельское хозяйство. Благодаря этому источнику в 2015 г. один человек в сутки потреблял 2940 ккал с прогнозом до 3050 к 2030 г. С точки зрения белкового обеспечения в настоящее время на каждого жителя планеты приходится 60 г. белка в сутки, при медицинской норме 70 г. Общий дефицит белка на планете оценивается в 10-25 млн. т. в год. Из 7,5 млрд человек, живущих на Земле, приблизительно половина страдает от недостатка белка.

- Вторым важным источником продовольствия является рыбное хозяйство и рыболовство в природных водах. В 2016 г. каждый человек в среднем потребил около 22 кг рыбной продукции. Живой мир океанов и морей в настоящее время обеспечивает около 20% потребностей человечества в белках животного происхождения. Биомасса океана насчитывает 150 тысяч видов животных и 10 тысяч водорослей, а ее общий объем оценивается в 35 миллиардов тонн, чего вполне может хватить, чтобы прокормить 30 миллиардов человек.

- Гипотетическим источником пищи может рассматриваться дикая растительность и в первую очередь лес, где находятся дикие животные, дикорастущие съедобные растения, плоды, корни, луковицы, молодые побеги, стебли, листья, почки, цветы и орехи. Дальнейшее развитие пищевой промышленности и соответствующей науки позволит расширить использование первичной биомассы дикой растительности для производства продуктов питания.

Как следует из рис. 3-5 общая тенденция в различных странах в производстве продуктов питания характеризуется наращиванием объемов производимой пищи. Уже в начале 21-го столетия практически большинство стран по производству пищи достигли сравнимых уровней. Остается не решенной проблема справедливого подушного распределения. Эта достаточно сложная проблема тесно связана с социально-экономическим и культурно-идеологическим пространством, сечения которого могут кардинально различаться в зависимости от типа мировоззрения и традиционного представления о справедливости. Попытки поиска такой справедливости реализуются с помощью различного рода индикаторов. Как видно из рис. 6-8 сечения индикаторного пространства СКПО содержат много неопределенностей относительно возможных причин неравномерного распределения жизненно-важных ресурсов.

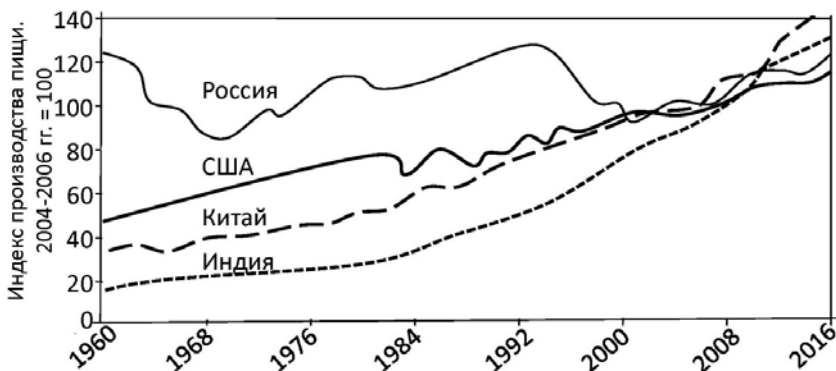


Рис. 3. Показатели производства пищи в крупных странах.

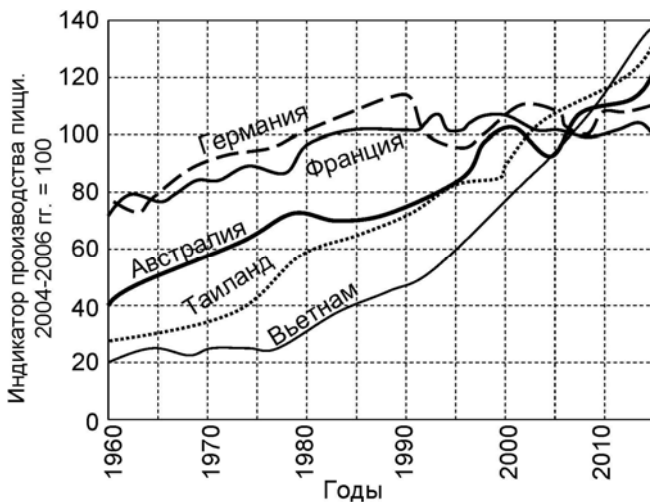


Рис. 4. Сравнение показателей производства пищи в развитых и развивающихся странах.

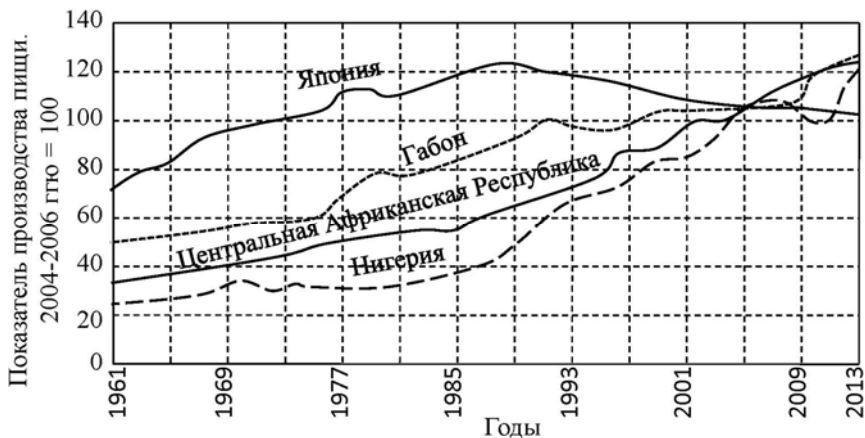


Рис. 5. Сопоставление темпов производства продуктов питания в развитой стране и слаборазвитых странах.

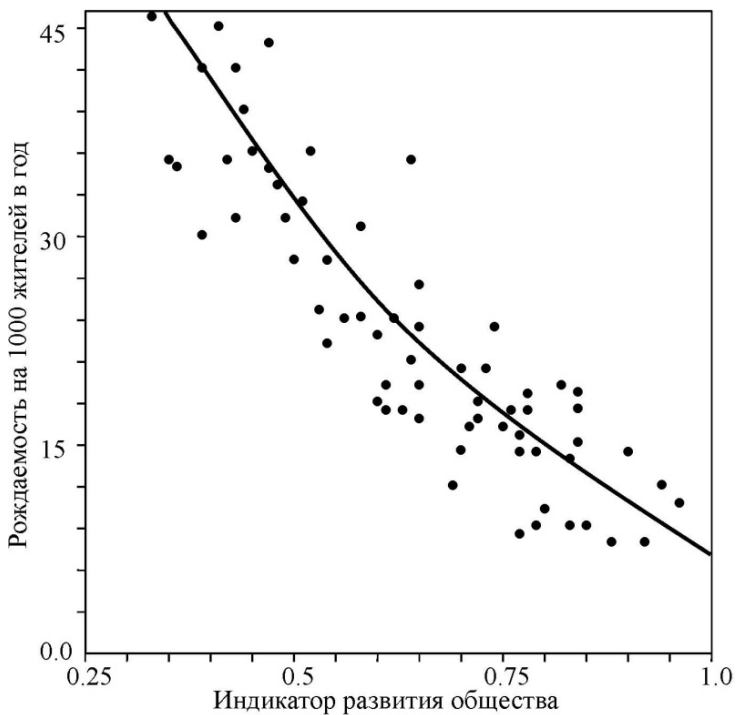


Рис. 6. Зависимость рождаемости от показателя развития общества.

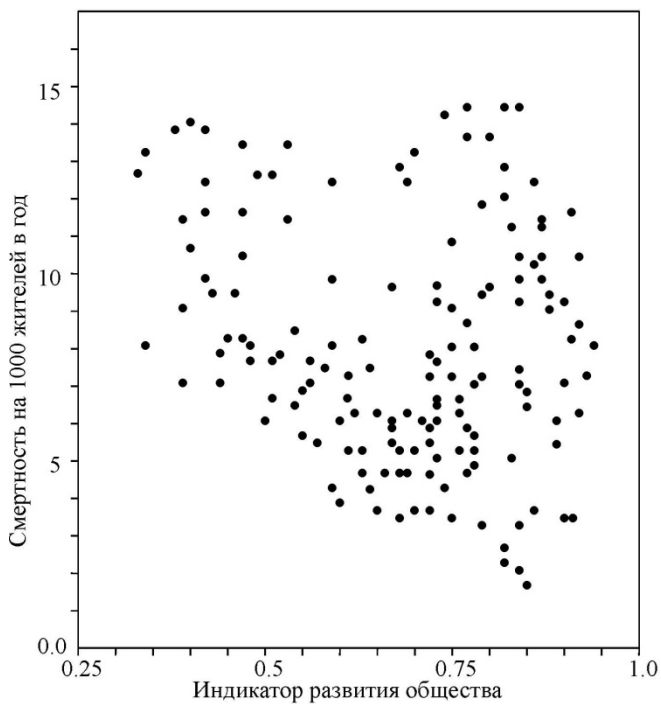


Рис. 7. Зависимость смертности от уровня развития общества.

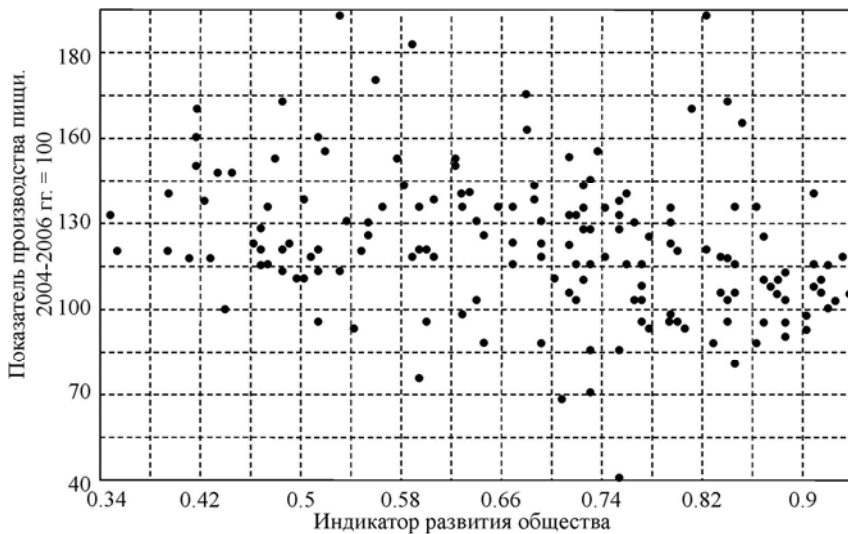


Рис. 8. Зависимость показателя производимой пищи от уровня развития общества.

Так или иначе, проблема выживания человечества сводится к обеспеченности населения пищей, а следовательно необходимо искать закономерности, которые бы могли объяснить как формируется глобальное распределение продуктов питания и водных ресурсов в зависимости от вектора направленности глобализации.

Согласно [21] функции $R_G(\varphi, \lambda, t)$ и $M_G(\varphi, \lambda, t)$ в (4) могут быть формализованы в следующем виде:

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

где μ_B и μ_d – коэффициенты рождаемости и смертности соответственно, ω – показатель влияния плотности населения на смертность. Эти коэффициенты являются функциями характеристик окружающей среды и общества:

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

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

где μ_1 и μ_2 – коэффициенты максимальной и минимальной рождаемости соответственно, η_1 и η_2 – коэффициенты максимальной и минимальной смертности соответственно, ρ , β , χ_1 , χ_2 , χ_3 , ξ_1 , ξ_2 и ξ_3 – адаптационные коэффициенты; V_G – эффективный размер пищи, определяемый как взвешенная сумма составляющих пищевого спектра человека, рассчитываемых блоками МАЭО, МФАА, МЭС и МФО. В общем виде имеем:

$$V_G(\varphi, \lambda, t) = [kd_1 R_\phi + rR_A + (1-k-r-\theta)R_H] \sigma(\varphi, \lambda) / G(\varphi, \lambda, t) + d_2 R_p, \quad (8)$$

где R_ϕ , R_A , R_H и R_p – продукция наземной растительности, сельского хозяйства, наземных водных систем и океана соответственно; d_1 и d_2 – коэффициенты, определяющие вклад наземной растительности и океана в пищевой спектр населения. Эти функции координат и времени определяют уровень обеспеченности населения пищей.

Имитационные эксперименты

Из всего существующего многообразия классификаций растительных покровов выберем схему, представленную на рис. 9 и в табл. 2. Значения коэффициентов ГИМС даны в табл. 3. Безусловно, эти коэффициенты в общем случае зависят от времени, хотя, конечно, изменяются незначительно за рассматриваемый период. Вместе с тем, зависимость этих коэффициентов от региона позволяет повысить надежность результатов моделирования. Разумеется, точность прогнозов может быть оценена лишь через много лет и даже десятилетий. Тем не менее, целый комплекс посылов и предположений, заложенных в структуру ГИМС, определяют целостную картину мира и формируют механизм конструктивного описа-

ния прямых и обратных связей в СКПО, выживаемость которой определяется критерием (2). Ясно, что биологическая сложность окружающей среды напрямую определяет уровень обеспеченности населения пищи. Как следует из рис. 10, вклад природной среды в это обеспечение имеет неравномерное пространственное распределение. Соответственное синхронное распределение имеют вклад сельского хозяйства и рыбной промышленности в производство пищи.

Блоки ГИМС, обеспечивающие расчет средней региональной температуры (КМ) и регионального водного баланса (МРВБ), позволяют оценить продукцию наземной растительности (блок БМПРФ) как функцию температуры и осадков. Фрагмент таких оценок приведен в табл. 4.

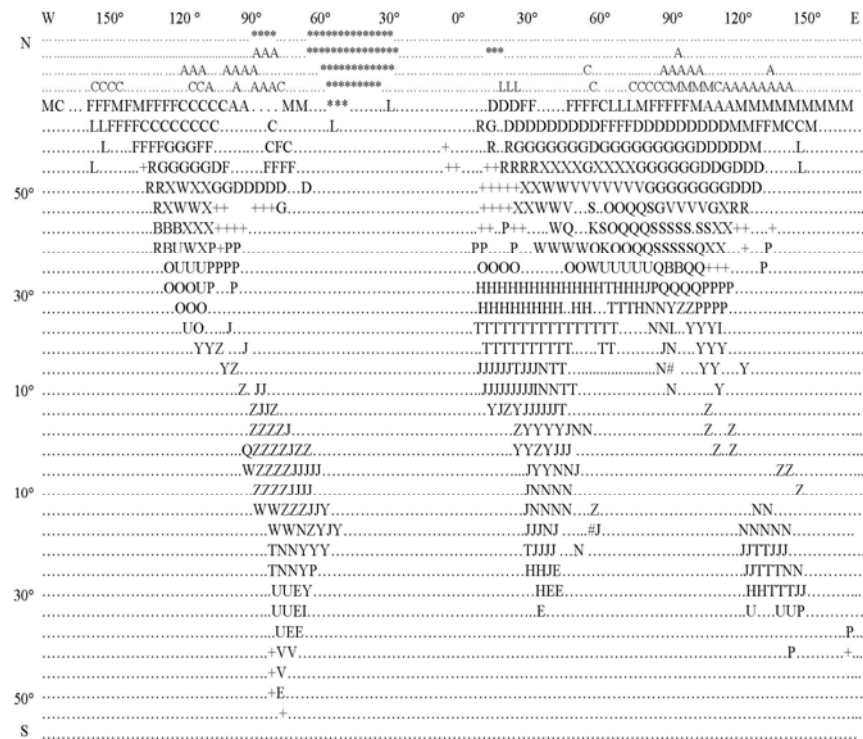


Рис. 9. Распределение почвенно-растительных формаций. Обозначения даны в табл. 2.

Таблица 2

Количественные характеристики типов наземных растительных формаций.

Обозначения: σ_s – площадь формации (млн. км²), R_ϕ - годовой прирост биомассы (кг·м⁻²год⁻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

Коэффициенты ГИМС для суши.

Коэффициент	Регион Ξ_{LD}	Регион Ξ_{LM}	Регион Ξ_{LG}
ρ	1.19	1.26	1.32
β	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
γ , °C	34	34	34
ω	0.56	0.61	0.67
d_1 , %	2.3	2.4	2.6
d_2 , %	1.0	1.2	1.7

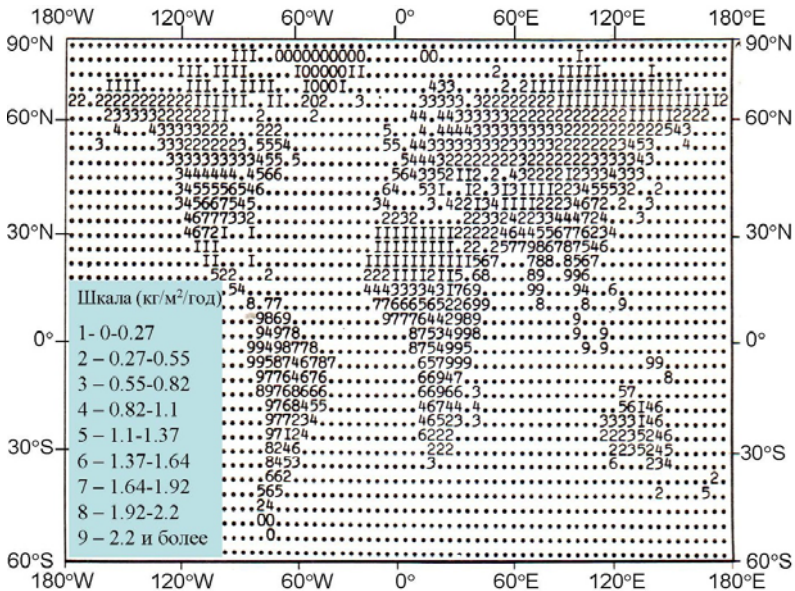


Рис. 10. Картограмма продукции почвенно-растительных формаций, представленных в табл. 2 по 10-ти бальной шкале на сетке 4°×5°.

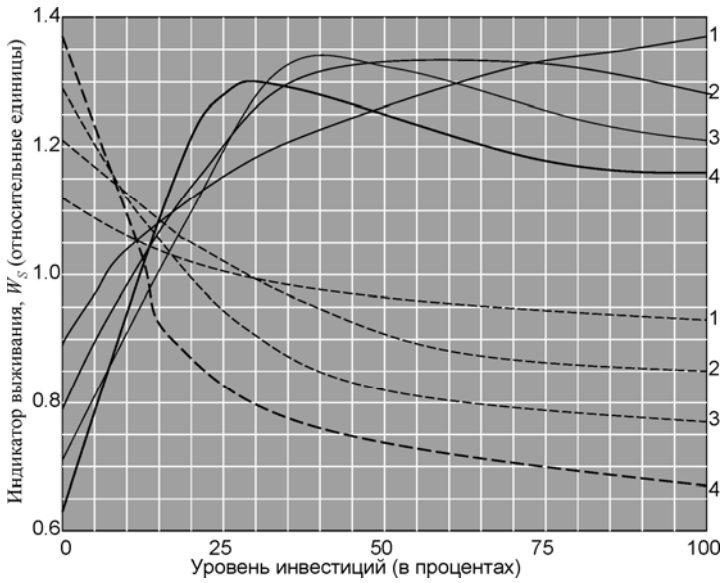
Зависимость годичной продукции (кг/м²/год) наземной растительности от средней годовой температуры атмосферы ($T_{\text{ср}}$) и полного количества осадков ($P_{\text{ср}}$), $R_{\phi}(T_{\text{ср}}, P_{\text{ср}})$.

Осадки (мм/год)	Температура атмосферы (°C)											
	-14	-10	-6	-2	2	6	10	14	18	22	26	30
3125							3.4	3.5	3.7	3.8	3.9	4.0
2875							3.2	3.3	3.5	3.6	3.7	3.8
2625							3.0	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
2375							2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3
2125							2.5	2.6	2.7	2.9	2.9	3.0
1875						1.6	2.3	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
1625				0.4	0.6	1.3	2.0	2.1	2.1	2.2	2.3	2.4
1375		0.2	0.3	0.4	0.7	1.1	1.7	1.9	1.9	2.1	2.1	2.0
1125	0.2	0.3	0.3	0.4	0.6	1.0	1.6	1.8	1.9	1.8	1.8	1.7
875	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	0.9	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2
625	0.3	0.3	0.5	0.6	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7
375	0.4	0.4	0.5	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
125	0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1

Будем считать, что важным для каждой системы является ее выживание, уровень которого характеризуется индикатором $W_s(t)$. Благодаря ГИМС конструируется целостная картина динамики численности населения с учетом принятой пиксельной структуры окружающей среды и соответствующих взаимодействий между биосферой и климатической системой. Одним словом, предложенный вариант глобальной модели СКПО не исчерпывает описание сложно организованной реальности, но совершенствует структуру имеющихся глобальных моделей и тем самым позволяет в рамках определенных гипотез рассчитать динамику численности населения.

Внутренний ресурс каждого региона определяется уровнем валового внутреннего продукта (ВВП) и его распределением по стратегическим целям. Кривые на рис. 11 показывают зависимость уровня выживания системы от распределения инвестиций и демонстрируют зависимость уровня жизни населения от распределения ВВП по секторам экономики, что вполне естественно справедливо только на определенном ближайшем периоде времени. В целом, ГИМС позволяет рассчитать динамику численности населения при определенных предположениях. Рассмотрим некоторые из них. На рис. 12 представлен такой прогноз при следующих предположениях (сценарий А):

- в период до 2050 г. будет преодолена проблема, возникающая из-за ограниченности источников энергии;
- выбросы парниковых газов к 2050 г. возрастут на 10% по сравнению с 2015 г., а затем начнут равномерно сокращаться к 2100 г. до уровня 5% к 2200 г.;
- будут созданы технологии повышения урожайности сельскохозяйственных экосистем на 100% к 2050 г. и на 200% к концу 22-го столетия;
- темпы замены лесных экосистем пахотными землями к 2050 г. снизятся в 10 раз по сравнению с 2015 г. и далее залесенные пиксели останутся не тронутыми;
- вклад биологических ресурсов Мирового океана в производство пищи с 1% в 2015 г. повысится до 5% к 2050 г. и будет равномерно расти до 10% к 2200 г.



γ

Рис. 11. Зависимость индикатора выживания от распределения ВВП по секторам: сельское хозяйство (сплошные кривые) и промышленность (пунктирные кривые). Числа справа от кривых показывают временной промежуток для инвестиций: 1 – 25 лет, 2 – 50 лет, 3 – 75 лет, and 4 – 100 лет.

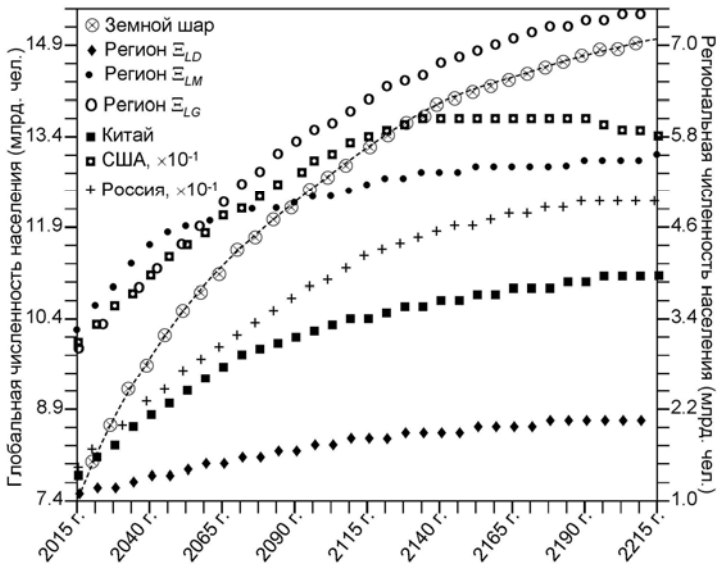


Рис. 12. Глобальная и региональная динамика численности населения до начала 23-го столетия.

Как следует из результатов, приведенных на рис.12, к началу 23-го столетия численность населения может достичь 14.9 млрд человек с тенденцией незначительного роста. Процентное распределение населения по регионам изменится в сторону увеличения на 6.9% доли развивающихся стран. Доля развитых стран сократится на 2.1%. А доля стран со средним развитием уменьшится на 4.8%. Эти изменения вызваны различными скоростями рождаемости и смертности в уравнениях (6) и (7) как функций состояния общества и обеспечением пищей, а также климатических параметров. На рис. 13 указаны некоторые из этих характеристик в их динамике до 2215 г. Видно, что априорные предположения о динамике различных факторов антропогенного воздействия на окружающую среду играют значимую роль в развитии всех элементов системы климат-природа-общество. К сожалению, эти предположения удастся реализовать только в виде сценариев [5,8,33]. Реализация сценария RCP8.5 дает повышение концентрации CO_2 в атмосфере к началу 23-го столетия до 800 млн^{-1} с достижением максимального уровня повышения приземной температуры почти на 3°C . В тоже время достаточно правдоподобный сценарий RCP2.6 приводит к соответствующим уровням 520 млн^{-1} по CO_2 и 0.8°C по изменению температуры к середине 22-го столетия с последующим снижением этих показателей. Следовательно, для более точного прогнозирования необходим детальный экспертный анализ существующих тенденций социально-экономического развития общества. Тем не менее, даже гипотетические сценарии обеспечивают данные для размышлений о возможных безопасных путях развития человечества с выживанием длительное время.

Дополнительно к рис. 12 рис. 14 показывает динамику жизненно важных факторов, которые формируют эволюционный процесс развития общества. Коэффициент рождаемости μ_B для регионов Ξ_{LD} , Ξ_{LM} и Ξ_{LG} изменится с 0.0115, 0.0177 и 0.0267 в 2015 г на 0.005, 0.0098 и 0.0191 в 2200 г. соответственно. При этом коэффициент рождаемости в регионах Ξ_{LD} и Ξ_{LM} со временем будет равномерно уменьшаться, а в регионе Ξ_{LG} достигнет максимального значения 0.034 в 2060 г. и затем будет уменьшаться. Аналогично изменяется коэффициент смертности μ_d по регионам Ξ_{LD} , Ξ_{LM} и Ξ_{LG} с 0.0107, 0.0138 и 0.0175 в 2015 г. до 0.0121, 0.0153 и 0.0211 в 2200 г. соответственно.

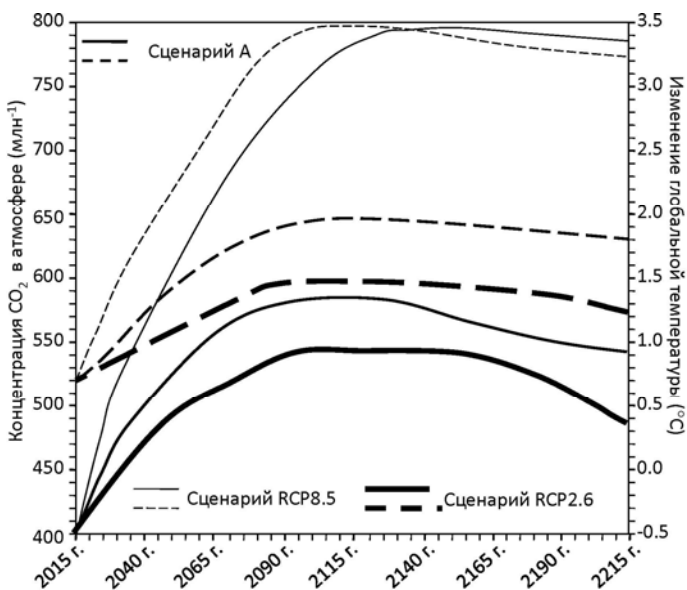


Рис. 13. Динамика климатических факторов (концентрация CO₂ – сплошные линии; температура – прерывистые линии) в системе климат-природа-общество.

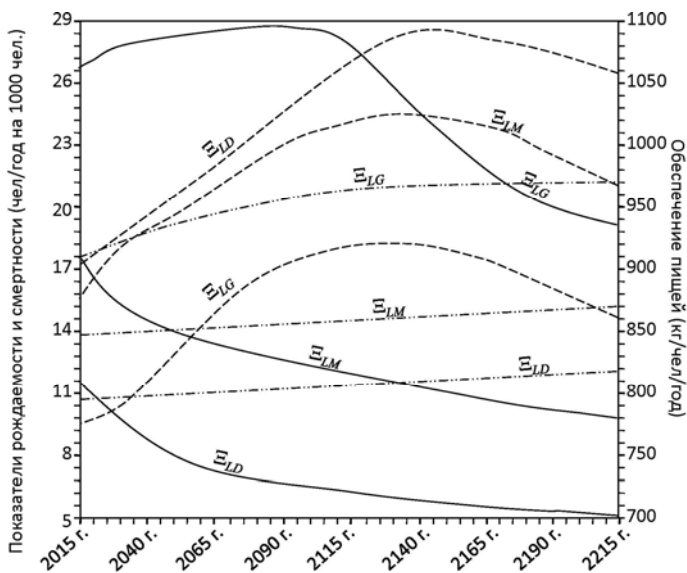


Рис. 14. Динамика жизненно важных факторов в системе климат-природа-общество (обеспечение пищей по регионам экономического развития – прерывистые линии; рождаемость – сплошные линии; смертность – штрих-пунктирные линии).
На кривых указаны идентификаторы регионов.

Заключение

Предложенный вариант глобальной геоэкологической информационно-моделирующей системы (ГИМС) дает инструментарий для изучения и оценки предельных воздействий человека на биосферу с пониманием ее реакций и выявлением запретных границ возможной человеческой активности. При этом ГИМС позволяет выявлять региональные экологические реакции на воздействия в пределах ограниченного количества пространственных пикселей. Безусловно, ГИМС отражает ограниченный спектр взаимодействий в СКПО с особым акцентом на максимальный учет экологических взаимодействий. Предложенная структура ГИМС допускает развитие путем добавления блоков, параметризующих социально-экономические процессы и учитывающих их влияние на биосферу и климат.

Основанная на ГИМС-технологии модель глобальных процессов в системе климат-природа-общество принципиально отличается от других глобальных моделей возможностью эволюционной адаптации к предистории по показателям выбранных индикаторов состояния СКПО. Безусловно, сам процесс адаптации и выбор информативных индикаторов требуют дополнительных исследований.

Приведенные результаты моделирования в рамках определенных вполне реальных предположений о динамике развития ряда жизненно-важных процессов показывают, что вопрос о выживании человечества в связи с ростом численности населения в ближайшие два столетия не будет иметь слишком негативных последствий. Другими словами, человечество и биосфера могут сосуществовать длительное время при условии принятия необходимых решений об охране окружающей среды, особенно лесных экосистем и гидросферы.

Литература (References)

1. Anderson B.A. World population dynamics: An introduction to demography. Cambridge: Pearson Publ. Ltd. 2015. 544 pp.
2. Dao Van Tuyet, Nguyen Xuan Man, Le Thi Thuy Van, Krapivin V.F., Mkrtychyan 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, 2015, pp. 50-58.
3. Degermendzhi A.G. New directions in biophysical ecology. In: A.P. Cracknell, V.F. Krapivin, and C.A. Varotsos (Eds.). *Global Climatology and Ecodynamics*. Springer/Praxis, Chichester, 2009, pp. 379-396.
4. Degermendzhi A.G., Bartsev S.I., Gubanov V.G., Erokhin D.V., and 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, pp. 241-300.
5. 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. Vol. 40. Issue 9. P. 2123–2165.
6. Forrester J.W. World dynamics. Cambridge. Mass.: Wright - Allen Press, 1971.
7. Forrester J.W. World dynamics. New York: Productivity Press Publishing. 1979. 142 pp.

8. Jianying Li, Jiangyu Mao in *Climate Dynamics* (2016) Changes in the boreal summer intraseasonal oscillation projected by the CNRM-CM5 model under the RCP 8.5 scenario // *Climate Dynamics*, 2016. Vol. 47. No. 12. P. 3713-3736. DOI: 10.1007/s00382-016-3038-2

9. Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. *Atmospheric Aerosol Properties: Formation, Processes and Impacts*. Chichester, U.K.: Springer/PRAXIS. 2006. 572 p.

10. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W. *Global environmental change: Modelling and Monitoring*. Berlin: Springer-Verlag. 2002. 319 pp.

11. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P., Varotsos C.A. *Global Ecodynamics: A Multidimensional Analysis*. Chichester U.K.: Springer/PRAXIS. 2004. 658 pp.

12. Kondratyev K. Ya., Krapivin V. F. and Varotsos C. A. *Global Carbon Cycle and Climate Change*. Chichester, U.K.: Springer/PRAXIS. 2003. 372 pp.

13. Krapivin V.F. *Mathematical model for global ecological investigations // Ecological Modelling*, 1993. V. 67. Nr. 2-4. P. 103-127.

14. Krapivin V.F., Mkrtychyan 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, Hokaido, Japan. The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association (OSCORA), Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2016. P. 116-119.*

15. Krapivin V.F., Mkrtychyan 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, 2015, pp. 21-27.*

16. Krapivin V.F., Shutko A.M. *Information technologies for remote monitoring of the environment*. Chichester U.K.: Springer/Praxis. 2012. 498 pp.

17. Krapivin V.F., Varotsos C.A. *Biogeochemical cycles in globalization and sustainable development.*- Chichester, U.K.: Springer/Praxis. 2008. 562 p.

18. Krapivin V.F., Varotsos C.A. *Globalization and sustainable development*. Chichester, U.K.: Springer/Praxis. 2007. 304 p.

19. 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. Vol. 150-151. P. 47-54.

20. 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. Vol.150-151. P. 47-54.

21. 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.

22. Krapivin V.F., Vilkova L.P. *Model estimation of excess CO₂ distribution in biosphere structure // Ecological Modelling*. 1990. Vol. 50. No.1-3. P. 57-78.

23. Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens III W.W. *The limits to growth*. New York: Universe Books. 1972. 205 pp.

24. Meadows D.H., Randers J., Meadows D.L. *Limits of grows: the 30-years update*. Vermont: Chelsea Green Publishing. 2004. 338 pp.

25. Mintzer I.M. *A matter of degrees: the potential for controlling the greenhouse effect // World Resources Institute Res. Rep.*, 1987. Nr. 15. P. 1-70.

26. 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, 2015. P. 941-945.
27. Nitu C., Krapivin V.F., Bruno A. Intelligent techniques in ecology. Bucharest: Printech. 2000. 150 pp.
28. Nitu C., Krapivin V.F., Pruteanu E. Ecoinformatics: Intelligent Systems in Ecology. Bucharest, Rumania: Magic Print, Onesti. 2004. 411 pp.
29. Nitu C., Krapivin V.F., Soldatov V.Yu. Information-modeling technology for environmental investigations. Bucharest, Romania: Matrix Rom. 2013. 621 pp.
30. OECD/FAO (2016), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025*, OECD Publishing, Paris. DOI: http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2016-en.
31. Pawłowski A. Sustainable development as a civilizational revolution. A multi-disciplinary approach to the challenges of the 21st century. New York: CRC Press. 2011. 230 pp.
32. Pestel E. Beyond the limits to growth: a report to Club of Rome. New York: Universe Books. 1989. 191 pp.
33. 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
34. Saavedra-Rivano N. A critical analysis of the Mesarovic-Pestel world model // *Applied Mathematical Modelling*. 1979. Vol. 3. Issue 5. P. 384-390.
35. 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 // *J. of Climate*, 1996. V. 9. Nr. 4. P. 708-737.
36. Sergin V.Ya., Sergin S.Ya. Studies on climatic change dynamics in the Pleistocene. Reports of the USSR Academy of Sciences, 1969. Vol. 186. No. 4. P. 897-900.
37. Tarko A.M. Analysis of Global and Regional Changes in Biogeochemical Carbon Cycle: A Spatially Distributed Model. Laxenburg, Austria: Interim Report, IR-03-041, IIASA, 2003. 28 pp.
38. The state of world fisheries and aquaculture: contributing to food security and nutrition for all. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 2016. 190 pp.
39. 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
40. Vernadsky V.I. Essays on geochemistry and the biosphere. Sante Fe, N.M.: Synergetic Press, 2006. 500 pp.