

УДК 519.6+62.501+574.5

© Ю.Н. Сергеев, В.П. Кулеш; ФНО «XXI век»

ПРОБЛЕМЫ ЦИКЛИЧНОГО И СТАЦИОНАРНОГО РАЗВИТИЯ ЦИВИЛИЗАЦИИ В ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЯХ

Ю.Н. Сергеев, В.П. Кулеш

Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Эл. почта: unsergeev36@gmail.com; vpkulesh@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.10.2016; принята к печати 07.02.2017

На основе глобальной модели развития «Мир-2», реализованной на языке MathCad (Мир-2МС), рассмотрена долгосрочная перспектива эволюции цивилизации, при этом в качестве невозобновляемых рассматриваются только топливные ресурсы. Дан краткий обзор основных глобальных моделей и предлагаемых в них алгоритмов перехода к «устойчивому равновесию». С учетом известных в демэкологии данных о затухающих колебаниях численности популяций относительно предельной численности, которую может поддерживать окружающая среда, показано, что это происходит в случаях, когда ресурсы, необходимые для жизни популяции, были накоплены прежде, чем начался ее рост. Именно такая ситуация имеет место с ископаемыми топливными ресурсами. Принятое в исходной модели «Мир-2» начальное условие для «невозобновляемых ресурсов» занижено в 3–4 раза. Сценарии развития цивилизации, реализованные на модели «Мир-2МС», показали, что при увеличении запасов топливных ресурсов в системе возникают колебания всех ее компонент. Число циклов изменяется от 2 до 4. Ограничителями роста численности населения в каждом цикле являются не запасы топливных ресурсов, а дефицит продовольствия и загрязнение окружающей среды. В каждом сценарии наступает стационарное состояние цивилизации с численностью 1,3–1,5 млрд человек. В сценарии с учетом запасов сланцевой нефти число циклов возрастает до 15. При увеличении энерговооруженности цивилизации за счет термоядерной энергетики компоненты мировой системы переходят в режим незатухающих гармонических осцилляторов. Показано, что предотвращение повторяющихся циклов возможно только за счет регулирования численности населения. Первого цикла уже не избежать. Время упущено. Переход к стационарному движению цивилизации возможен после завершения первого или последующих циклов. Оптимальное время перехода зависит от положения локально-стационарного состояния численности населения на оси времени. Такое состояние определяется по фазовому портрету в плоскости «численность населения – коэффициент ее прироста» (кривая Олли). Численность населения в локально-стационарном состоянии рассматривается как начальное условие в логистической модели роста популяции, а допустимый порог численности принимается равным 1,5 млрд человек. Время достижения стационарного по Ляпунову состояния Мировой системы регулируется одним параметром – коэффициентом прироста численности населения в локально-стационарной точке.

Ключевые слова: цивилизация, глобальная модель, топливные ресурсы, цикличность развития, стационарное состояние.

CYCLIC AND STATIONARY MODES OF THE DEVELOPMENT OF CIVILIZATION IN GLOBAL MODELS

Yu.N. Segeyev, V.P. Kulesh

Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

E-mail: unsergeev36@gmail.com; vpkulesh@gmail.com

The World2 model of civilization was modified using the Mathcad software environment. Based on the resulting Mir-2MC model, long-term scenarios of the evolution of civilization were considered upon the premise that only fuel resources are unrenewable and were compared with the main conventional global models and the respective algorithms of transition of modeled systems to stable equilibriums. With account of the ecological demography data about convergent oscillations of populations on their ways to steady states below maximum levels sustainable by their environmental resources, it has been shown that this may occur if resources for growth have been accumulated before growth began. This is what is exactly true for fossil fuel resources. The initial level of unrenewable resources is underestimated three- to fourfold in the World2 model. The developmental scenarios suggested by the Mir-2MC model show that increasing the initial levels of resources may lead to oscillations of all components of a modeled system. The number of oscillations are in the range from two to four, and population size in each of the oscillation is limited by not fuel resources but by food deficit and environmental pollution. Each scenario leads to a stationary population size ranging from 1.3 to 1.5 billion. In scenarios accounting of shale oil resources, oscillations number may reach 15. Increasing the available power by thermonuclear power supplies transforms developmental trajectories into undamped harmonic oscillators. Only population control measures can be effective in preventing the repetitions of population size oscillation. The first oscillation is already inevitable. The time to prevent it has been lost. A stationary state is possible only following the first or the second oscillation. The optimal time of transition to a final stationary state depends on the position of the locally stationary state of population size in time. This state is determined by the phase portrait in the “population size – relative population increment” plain (Allee curve). Population size in a locally stationary state is assumed as the initial condition in the logistic model of population growth, and the tolerable threshold of population size is found to be 1.5 billion. The time to Lyapunov stationary state of the World system critically depends on the single parameter, which is population increment coefficient in the locally stationary point.

Keywords: civilization, global model, fuel resources, oscillatory development, stationary state.

Введение

Сегодня человечество переживает развивающиеся демографический, социально-экономический и экологический кризисы, постепенно перерастающие в катастрофу цивилизации. Невежественные люди не видят ее, а социальные оптимисты не верят в нее. Появившееся недавно успокаивающее понятие «устойчивое развитие», определяемое как «такое развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности» никак не способствует пониманию пути, ведущему к предотвращению или смягчению надвигающейся катастрофы.

Между тем, этот путь могут подсказать математические модели глобального развития. Создатель первой такой модели Дж. Форрестер (J.W. Forrester) свою концепцию глобального моделирования изложил на заседании комиссии палаты представителей конгресса США следующим образом: «Мой основной тезис состоит в том, что человеческий мозг не способен постигнуть, как функционируют социальные системы... На протяжении долгой истории эволюции для человека не было никакой необходимости познавать такие системы... Наши социальные системы несравненно более сложны и трудны для понимания, чем наши технические системы. Почему же мы в таком случае не моделируем социальные системы прежде, чем пытаемся внедрить новые законы и правительственные программы? Я настаиваю на том, что мы обладаем достаточными знаниями для создания полезных моделей социальных систем» [2, с. 191].

Проницательный исследователь природы и общества Дж. Форрестер включил в свою модель «Мир-2» все принципиально важные, решающие компоненты Мировой системы. Талантливая простота модели и, в то же время, ее способность отображать, воспроизводить и замещать объект исследования не остались без внимания.

Именно поэтому модель «Мир-2» послужила основой для многих последующих работ по глобальному моделированию, в том числе и нашей.

В настоящей статье речь пойдет о долгосрочной перспективе развития цивилизации. Будет показано, что в XXI столетии цивилизацию ожидает не катастрофа, а глубочайший кризис, за которым последует восстановление. Развитие цивилизации в третьем тысячелетии может носить циклический характер. Число циклов должно увеличиваться по мере возрастания энерговооруженности цивилизации. Переход к стационарному движению, соответствующему допустимому порогу возмущения биосферы, возможен только после завершения первого или последующего циклов развития. Показано, что для такого перехода целесообразно использовать логистическую модель роста численности населения.

1. ПОИСКИ ПУТИ К ГЛОБАЛЬНОМУ РАВНОВЕСИЮ

1.1. Учение Мальтуса

В 1798 г. английский епископ Т.Р. Malthus в книге «Опыт о принципах народонаселения» [38] сформулировал простейшую математическую модель роста численности населения P :

$$\frac{dP}{dt} = \varepsilon P. \quad (1)$$

Здесь t – время; $\varepsilon = \text{const} > 0$ – коэффициент прироста численности. Аналитическое решение этого уравнения имеет вид

$$P(t) = P_0 e^{\varepsilon(t-t_0)}, \quad (2)$$

где: P_0 – численность населения в начальный момент времени t_0 ; e – основание натурального логарифма.

Экспоненциальная функция роста численности населения (2) в классической демэкологии получила название кривой биотического потенциала. Она показывает, что при изменении времени (а не ресурсов!) в арифметической прогрессии численность населения растет в геометрической прогрессии при условии, что на популяцию не действуют какие-либо факторы, ограничивающие рост численности. При $\varepsilon = 0$ численность населения не изменяется, а при $\varepsilon = \text{const} < 0$ она уменьшается по экспоненте.

Наблюдающаяся у популяций животных отрицательная корреляция между ε и P свидетельствует о том, что существуют ограничивающие факторы, приводящие численность каждой популяции к оптимальному значению, соответствующему емкости среды ее обитания. Единственным видом среди животных, у которого наблюдается положительная корреляция между ε и P , является вид *Homo sapiens*, «человек разумный». Действительно, по данным статистики, за последние 189 лет численность населения планеты (млрд человек) возросла на 6,3 (в 1827 г. она составляла 1, в 1930 г. – 2, в 1960 г. – 3, в 1975 г. – 4, в 1987 г. – 5, в 2000 г. – 6, в 2012 г. – 7, в 2016 г. – 7,3. Коэффициенты прироста численности населения в XIX–XX вв. оцениваются величинами: $\varepsilon_{(1880)} = 0,0065$, $\varepsilon_{(1945)} = 0,0133$, $\varepsilon_{(1968)} = 0,0191$, $\varepsilon_{(1981)} = 0,0179$, $\varepsilon_{(1993)} = 0,014$, $\varepsilon_{(2006)} = 0,0128$. Таким образом, в период с 1827 по 1968 г. население Земли увеличилось даже быстрее, чем это следует из модели Мальтуса при $\varepsilon_{(1880)} = \text{const}$. Авторы одной из глобальных моделей развития М. Мессарович и Э. Пестель в 1974 г. писали: «Мир болен раком, и этот рак – человек» (цитируется по С.Б. Лаврову [14, с. 55]).

В модели (2) отсутствуют какие-либо факторы, ограничивающие рост численности населения. Интуитивно считается, что недостаток продуктов питания приведет к гибели цивилизации и поэтому войны,

эпидемии и голодоморы могут отсрочить апокалипсис. Антигуманный и бездоказательный характер этих утверждений, по-видимому, послужил причиной того, что классики научного коммунизма подвергли «мальтузианство» уничтожающей критике, объявив его антинаучной и реакционной теорией.

1.2. «Мальтусы с компьютерами» или провидцы?

В 1971–1974 гг. J.W. Forrester и O.L. Meadows предложили первые глобальные модели развития цивилизации «Мир-2» и «Мир-3» (World2, World3), построенные на принципе системной динамики – методе изучения сложных систем с нелинейными обратными связями, разработанном в Массачусетском технологическом институте [32, 39]. Английский экономист К. Фримен (К. Freeman), не согласный с апокалиптическим характером пророчеств модели «Мир-3», окрестил ее автора «Мальтусом с компьютером» [10, с. 144]. В зависимости от точки зрения это прозвище можно рассматривать как порицание или как комплимент. Порицание – за пророчество демографической, экономической и экологической катастрофы во второй половине XXI в., а комплимент – за сравнительную простоту модели, обеспечивающую понимание заложенного в нее алгоритма.

Модель «Мир-2» представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений пятого порядка. При задании правых частей уравнений используются графические (таблично заданные функциональные зависимости), описывающие нелинейные связи между компонентами Мировой социально-экономической системы: численностью населения P , капиталом (основными фондами экономики) K , долей сельскохозяйственного капитала X , загрязнением окружающей среды Z , запасами невозобновляемых природных ресурсов R [32]. Уравнения для переменных P , K , X , Z формируются с использованием балансового принципа:

$$d\varphi_i/dt = V_i^+ - V_i^-, i = 1, 2, 3, 4; \quad (3)$$

где: V_i^+ , V_i^- – скорости (темпы поступления или убыли компонентов системы);

φ_i – один из четырех компонентов.

В уравнении для переменной R балансовый принцип не соблюдается. Запасы невозобновляемых ресурсов могут только убывать со скоростью V_5^- , зависящей от численности населения и материального уровня их жизни.

Моделирование развития Мировой социально-экономической системы осуществлялось на временном интервале с 1900 по 2100 г. Начальные условия для компонентов модели принимались по данным мировой статистики. Параметризация и идентификация модели проводилась на интервале с 1900 по 1970 г. Параметризация заключалась в варьировании значе-

ниями параметров и табличных зависимостей в пределах той точности, с которой они известны из исторических данных.

Расчеты показали, что при современных тенденциях развития Мировой системы вслед за бурным развитием цивилизации в XX – начале XXI в. должна последовать катастрофа, связанная с истощением запасов невозобновляемых природных ресурсов, продуктов питания и загрязнением окружающей среды (рис. 1).

Начиная с 20–30 гг. XXI в. рост численности населения Земли прекратится, а в течение последующих 75 лет численность сократится на 2 млрд человек. Невозобновляемых природных ресурсов останется менее 1/3 начальных запасов. Загрязнение окружающей среды к 2050 г. в 7–8 раз превысит уровень 1970 г. Уменьшение запасов природных и трудовых ресурсов приведет в середине XXI в. к существенному сокращению выпуска промышленной и сельскохозяйственной продукции.

В поисках способа предотвратить катастрофу Дж. Форрестер выдвинул идею перехода к глобальному равновесию (нулевому росту компонентов системы). Моделирование одного из многих сценариев показало, что такой переход на промежутке времени 1900–2100 гг. возможен при следующих ограничениях: начиная с 1970 г. скорость потребления невозобновляемых природных ресурсов должна быть уменьшена в 4 раза по сравнению с 1970 г.; генерация загрязнений должна быть уменьшена в 2 раза; инвестиции в экономику должны быть уменьшены вдвое, а производство пищевых продуктов на 20%; рождаемость населения должна быть уменьшена на 30%. Нереальность выполнения этих требований очевидна.

Апокалиптические пророчества вызвали широкую дискуссию в печати. Критики модели «Мир-2», отмечавшие упрощенное описание структуры Мировой системы и отсутствие возможности воздействия общества на ее развитие, побудили Римский клуб продолжить финансирование исследований по глобальному моделированию. D.L. Meadows получил заказ на разработку модели «Мир-3» (Пределы роста [39]).

Модель «Мир-3» содержит 12 основных дифференциальных уравнений первого порядка для компонент Мировой системы, 16 вспомогательных дифференциальных уравнений, предназначенных для организации процедур сглаживания и эффекта запаздывания по времени для некоторых социально-экономических характеристик, а также ряда алгебраических выражений и таблично заданных функций. Компонентами модели являются: 4 возрастные группы населения; капитал промышленных и сервисных предприятий; площадь потенциально пригодных для обработки земель; урбанизированная площадь; разрушенная почвенной эрозией площадь; загрязнение природной среды; невозобновляемые природные ресурсы.

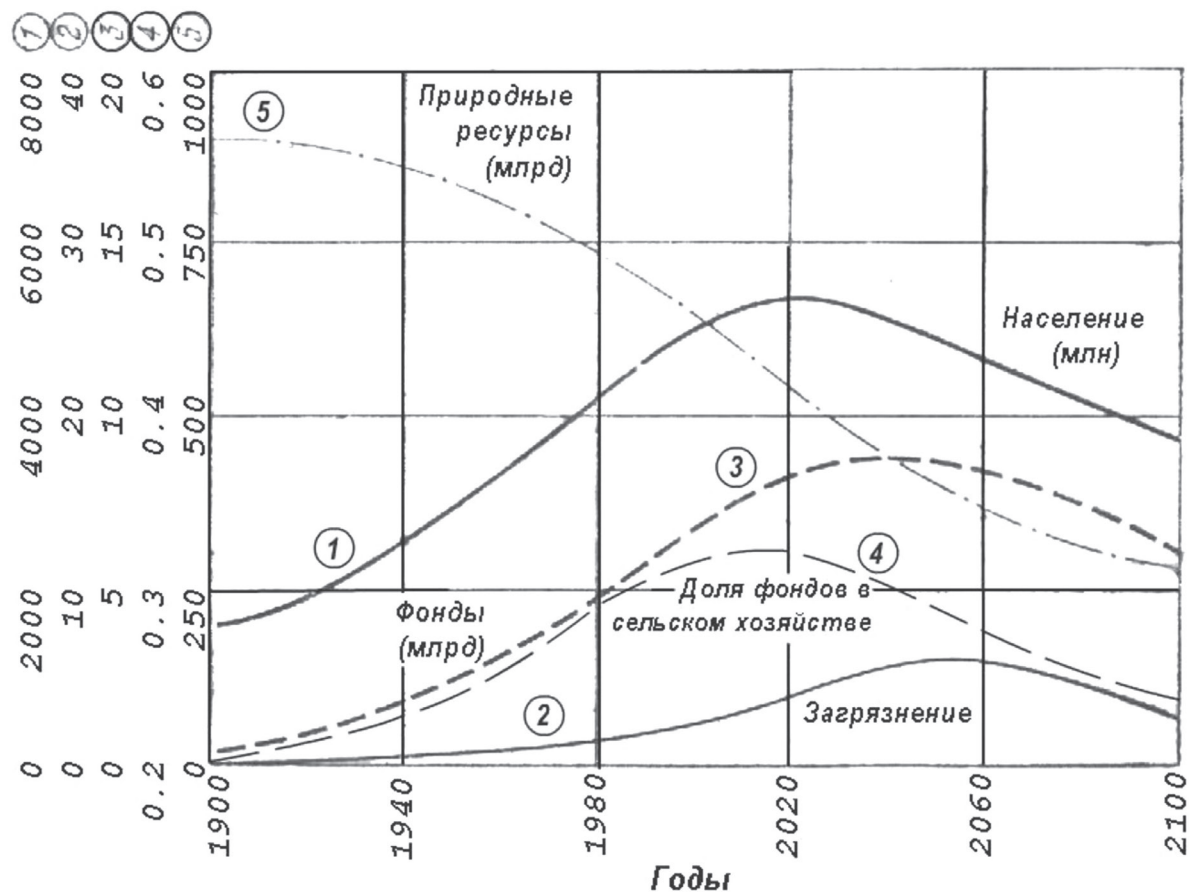


Рис. 1. Временная изменчивость компонентов глобальной социально-экологической системы в модели «Мир-2»; базовый сценарий [32]. Первоначальные запасы невозобновляемых природных ресурсов (100%) – $900 \cdot 10^9$ ресурсных единиц (РЕ)

Усложнение структуры модели «Мир-3» принципиально не повлияло на результаты моделирования. Расчеты показали, что во второй половине XXI в. произойдут демографическая, экономическая и экологическая катастрофы, вызванные быстрым ростом численности населения, недостатком продуктов питания, загрязнением окружающей среды и недостатком невозобновляемых природных ресурсов. Предотвратить гибель цивилизации, то есть достигнуть «глобального равновесия», согласно модели «Мир-3», можно только путем незамедлительного (то есть с начала 70-х гг. XX столетия) введения следующего комплекса мер: рождаемость должна обеспечивать лишь простое воспроизводство населения, а его численность должна быть стабилизирована на уровне 1945 г. (приблизительно 2,6 млрд человек); индустриальное развитие должно быть стабилизировано на уровне 1980 г.; потребление ресурсов на душу населения Земли не должно превышать 1/8 от уровня 1970 г.; время жизни основных производственных фондов должно быть увеличено в 1,5 раза; удель-

ная генерация загрязнений должна быть уменьшена до 1/4 по сравнению с уровнем 1970 г. Понятно, что эти условия невыполнимы.

1.3. Пространственно-неоднородные глобальные модели

Рассмотренные в разделе 1.2 пространственно-однородные модели не учитывают региональной дифференциации компонент Мировой социально-экологической системы. Поэтому дальнейшее развитие глобального моделирования на Западе шло по пути усложнения моделей. Осуществлялся переход от точечных (пространственно однородных) моделей к блочным моделям с пространственной структурой. Мир рассматривался не в целом, а дифференцированным на регионы. Вводились новые и дезагрегировались ранее использовавшиеся сектора экономики, демографии и экологии. Использовались разнообразные методы математического описания мысленных образов реального мира. К таким моделям относятся «Стратегия выживания» М. Месаровича и Э. Песте-

ля (М. Mesarovic, E. Pestel) [40]; Латиноамериканская модель глобального развития группы ученых во главе с А. Эррейрой (A. Herrera) [33–35, 42]; японский проект «Новый взгляд на развитие» Я. Кайа (Y. Kaaya) [36].

Вера в возможность наиболее адекватного отражения объекта изучения, свойственная исследователям этого направления, привела к появлению модельных «монстров», затрудняющих понимание принципов функционирования Мировой системы, и к сокращению временного интервала моделирования. В модели «Стратегия выживания» поведение системы изучается в интервале 1975–2025 гг., в Латиноамериканской модели – с 1975 по 2100 г., в японской модели «Новый взгляд на развитие» – с 1970 по 2010 г.

Модель «Стратегия выживания»

Примером системы «монстра» может служить модель «Стратегия выживания». В ней рассматривается взаимодействие 10 регионов Мира: Северная Америка, Западная Европа, Япония, Австралия и Южная Африка, СССР и страны Восточной Европы, Латинская Америка, Ближний Восток и Северная Африка, Тропическая Африка, Юго-Восточная Азия, Китай. Каждый регион описывается системой субмоделей: экономики, демографии, энергетики и т.д. Для каждого из регионов в модели выделены 19 категорий промышленного и 2 разновидности сельскохозяйственного капитала, 5 категорий капитала, занятого в энергетике. Отдельно рассмотрены капиталы, занятые в рыболовстве и горнодобывающей промышленности. Связь регионов происходит через миграции населения, экспорт и импорт.

Увлечение авторов географической дифференциацией регионов мира и избыточная детализация компонент модели видны из следующего примера. В демографических субмоделях рассматриваются смертность и возрастные переходы 85 одногодичных групп населения. В субмоделях производства продуктов питания рассматривается валовое производство 26 различных пищевых продуктов, вплоть до яиц, меда и съедобных потрохов. В кратком обзоре докладов Римскому клубу отмечается: «Если компьютерная модель Медоуза основывалась примерно на тысяче математических уравнений, то модель Месаровича-Пестеля содержала их более двухсот тысяч»¹.

Очевидно, что в модели «Стратегия выживания» нарушен один из основных принципов системного анализа, состоящий в том, что при моделировании сложных систем следует учитывать не все, а только наиболее существенные компоненты и связи соотношения система-оригинал. Это объясняется тем, что уравнения модели недостаточно точны по отношению к реальной системе, а данные социально-экономиче-

ского и экологического мониторингов, используемые при построении модели, содержат информационные шумы. Они связаны с погрешностями наблюдений и ошибками репрезентативности. Поскольку уравнения глобальных моделей существенно нелинейные, информационные шумы при их решении не подавляются, а возрастают, переводя модели из детерминированных в вероятностные [4]. Поэтому на больших промежутках времени модели «Мир-2» и «Мир-3», относящиеся к классу «точечных» по классификации Т.А. Айзатуллина, предпочтительнее «резервуарных».

Основным результатом модели «Стратегия выживания» является вывод, что цивилизации угрожает не глобальная катастрофа в середине XXI в., а серия региональных катастроф, наступающих в различных регионах одновременно и по разным причинам. «Новизна» этого вывода, в сочетании с трудозатратами на его получение, позволила С.Д. Дадаюну назвать создателей модели «Стратегия выживания» «компьютером без Мальтуса» [10, с. 145]. Авторы «Глобального доклада президенту США о перспективах на 2000 г.» дают такую оценку этой модели: «Ее структура чрезвычайно сложна. Настолько, что требуются недели, если не месяцы, чтобы понять ее либо принять на веру... Сделать выводы из анализа модели “Стратегия выживания” затруднительно... Очень трудно сказать, какие выводы были заранее вмонтированы в модель, а какие получены в результате ее реализации» (цитируется по [10, с. 150]).

Латиноамериканская модель глобального развития

В этой модели рассматриваются четыре региона: Африка, Латинская Америка, Азия, развитые страны. Функционирование каждого региона описывается пятью субмоделями: народонаселения, экономики и жилищного строительства, урбанизации, образования, питания населения. Регионы взаимодействуют между собой посредством торговли и безвозмездной помощи. Предполагается, что мировой кризис уже наступил и является следствием «порочности» общества потребления. Он не связан с истощением запасов природных ресурсов и загрязнением окружающей среды. Считается, что научно-технический прогресс позволяет без увеличения затрат разрабатывать месторождения с постоянно понижающейся концентрацией сырья, что термоядерный синтез является неисчерпаемым источником энергии, а эффективные технологии очистки загрязнений полностью решают проблему охраны окружающей среды.

Развитие каждого региона моделируется путем решения оптимизационной задачи. В качестве управляющих воздействий выбраны доли капитала и трудовых ресурсов. В модели реализованы два сценария взаимодействия регионов. В первом из них развитые

¹ <http://vals.narod.ru/rome1.htm#1>

страны не оказывают экономической помощи развивающимся регионам. Компоненты субмодели развитых стран уже через 20–30 лет, то есть к 1980 г., выходят на стационарный режим. Регион Латинской Америки достигает этого состояния через 40 лет, а компоненты субмоделей Азии и Африки не достигают стационарного состояния даже при оптимальном управлении. Во втором сценарии помощь развивающимся регионам оказывается начиная с 1980 г. и в течение 10 лет достигает 2% ежегодного конечного продукта фондообразующего сектора экономики развитых стран. В этом сценарии найдено управление, обеспечивающее стационарное развитие всех регионов модели. Для Азии и Африки компоненты модели достигают стационарного состояния приблизительно через 60 лет.

Таким образом с помощью пространственно-неоднородной глобальной модели впервые было показано, что экономическая помощь развитого региона Мира развивающимся регионам предотвращает катастрофы и переводит их социально-экологические системы в стационарный режим функционирования.

Экономические глобальные модели

Рядом исследователей построены специализированные глобальные модели, ориентированные на решение частных проблем глобалистики. При этом многие подсистемы мировой системы либо отсутствуют, либо считаются заданными и вводятся как внешние (экзогенные) переменные. «При таком подходе теряются основные преимущества глобального моделирования – системный анализ с учетом взаимного влияния различных факторов и процессов. Построение специализированных моделей должно осуществляться не “вырезанием” отдельного блока из общей структуры глобальной модели, а дезагрегацией одного или нескольких блоков с обязательным сохранением, хотя бы в самом агрегированном виде, их связей с остальной частью глобальной модели» [11, с. 20].

Особое место среди экономических моделей занимает проект «Будущее мировой экономики», созданный группой специалистов во главе с лауреатом Нобелевской премии В. Леонтьевым [37]. В основу проекта положен метод межотраслевого моделирования, известный как «анализ затрат-выпуска продукции». Для каждого из 15 регионов мира моделируются 45 секторов экономики. Рассматриваются 22 отрасли промышленности и строительства, 4 сектора сельского хозяйства, сферы торговли и услуг, транспорта и связи. Загрязнение окружающей среды моделируют 8 видов загрязнителей, и рассматриваются пять способов очистки. Модель, содержащая 2500 уравнений, реализуется на период 1980–2000 гг. по восьми сценариям развития мировой экономики. Проект направлен на проектирование экономического развития мира.

Под руководством лауреата Нобелевской премии Л. Клейна [12] создана система LINK. Эта система представляет собой совокупность разработанных независимо друг от друга моделей стран и регионов Мира, которые объединяются в «Мировую модель» посредством субмодели международной торговли. В систему LINK входят модели экономики США (207 уравнений), Канады (183 уравнения), Франции (32 уравнения), Великобритании (226 уравнений) и т.д. – всего свыше 20 региональных моделей. Система предназначена для экономических прогнозов с заблаговременностью до трех лет.

Особо следует рассмотреть модель «Будущее цивилизации и стратегия цивилизационного партнерства» на период до 2050 г., построенную под эгидой Международного института Питирима Сорокина – Николая Кондратьева коллективом ученых России и Казахстана [1]. Методика прогноза основана на использовании аддитивно наложенных логистической и циклической моделей. Их параметры определяются методом наименьших квадратов по временным рядам характеристик за период 1950–2006 гг. Составлен прогноз инновационно-технологического развития и баланса трудовых ресурсов по 12 локальным цивилизациям и по странам в каждой из них.

Рассматриваемая модель относится к классу статистических. Как и другие модели этого класса, она работоспособна только апостериори. Полученные модельные прогнозы на 2007–2050 гг. будут оправдываться в той степени, в какой можно ожидать повторения экономических ситуаций, имевших место в обучающих последовательностях за 1950–2006 гг.

Региональные модели развития

Первые доклады Римскому клубу, особенно «Пределы роста» с его всемирным резонансом, дали мощный толчок работам в области глобального моделирования, развернувшимся в 1970-е гг. Однако с разработкой все новых и новых моделей они привлекали все меньше и меньше внимания общественности, становясь узкой сферой деятельности и интересов специалистов. Римский клуб прислушался к многочисленным упрекам в «технизме» и стал искать более широкие подходы к глобальной проблематике². Так произошла инверсия различных этапов глобалистики, а именно, системный анализ сменился на системный подход. Глобальные математические модели заменила «вербальная глобалистика».

Но инверсии не бывают слишком продолжительными. «Узкие» специалисты продолжали создавать глобальные и региональные модели.

Первой региональной моделью с пространственной структурой был, по-видимому, многократно повто-

² <http://vals.narod.ru/rome1.htm#1>

ренный вариант модели «Мир-2», использующийся для исследования взаимодействия «богатых» и «бедных» регионов Швейцарии [43].

Разработанная в Ленинградском государственном университете региональная модель системы «СССР – города – сельские поселения страны – г. Ленинград» представляет собой симбиоз моделей «Мир-2» и «Мир-3» [26, 27]. При этом многие таблично заданные зависимости, отражающие интенсивности демографических, экономических и экологических процессов, получены по данным государственной статистики и экологического мониторинга СССР. В модели реализован принцип приоритетного действия системы верхнего иерархического уровня на подсистемы нижних уровней. Для упрощения задачи считается, что между системой страны и системами «регионов» существует только прямая связь: страна оказывает влияние на «регионы», но сама от них не зависит.

В конце этого раздела отметим, что подробное описание и анализ наиболее значимых «точечных» и пространственно-неоднородных моделей можно найти в книге Г.В. Осипова и В.А. Лисичкина «Глобальные модели развития человечества» [22]. Специалисту полезно ознакомиться со статьей [44], где обсуждается методология исследования того, что авторы называют антропоценом, и приводится перечень зарубежных публикаций, посвященных моделированию социально-экологических систем.

1.4. Восстанавливаем невозобновляемые ресурсы

В СССР и Российской Федерации опубликован ряд работ, посвященных поиску алгоритмов, выводящих глобальные модели на стационарный режим (в состоянии глобального равновесия). Авторы этих работ не строили новые модели, а занимались модификацией моделей «Мир-2» и «Мир-3». В основу исследований была положена идея перераспределения капитала Мировой экономики в пользу промышленного восстановления израсходованных невозобновляемых природных ресурсов и промышленной регенерации загрязнений. И все это предполагается осуществить в мировом масштабе за ближайшие 30–50 лет модельного времени, оставшегося до наступления мировой катастрофы, предсказываемой создателями моделей «Мир-2» и «Мир-3».

Первая модификация модели «Мир-2» была предложена В.А. Егоровым и соавторами [11]. Они ввели в правые части уравнений для невозобновляемых природных ресурсов и загрязнения среды управления в виде слагаемых (KU_R^0/C_R^0) и (KU_Z^0/C_Z^0) , а в уравнение для сельскохозяйственных фондов – множителем $(1-U_X^0)$. Здесь U_R^0, U_Z^0, U_X^0 – доли капитала K , направляемые на восстановление природных ресурсов, борьбу с загрязнениями и управление сельским хозяйством соответственно; $C_R^0 = 0,3, C_Z^0 = 0,4$ – число единиц капитала (ЕК), необ-

ходимое для восстановления единицы ресурсов и уничтожения единицы загрязнения. Управляющие функции для U_R^0, U_Z^0, U_X^0 являются функциями времени, и после их определения возникает возможность перераспределения капитала K между традиционными и новыми отраслями производства. Для определения управляющих функций решается задача оптимального управления: задается критерий и определяются функции, приводящие к максимуму выбранного критерия. Вариационная задача решалась на временном интервале 1975–2100 гг. и показала, что в XXI в. глобальной катастрофы можно избежать. Но при этом основные фонды предприятий, создаваемых для восстановления ресурсов и борьбы с загрязнениями, должны ежегодно возрастать, становясь в XXI в. сравнимыми со стоимостью фондов всех традиционных отраслей производства. «Соответственно и работа людей по предотвращению экономического кризиса должна стать сравнимой с работой, выполняемой во всех остальных областях деятельности» [11, с. 140]. Остается открытым вопрос, как долго может продолжаться процесс восстановления ресурсов после 2100 г. Их запасы в географической оболочке конечны, и, в соответствии с алгоритмом модели «Мир-2», они все же расходуются в процессе производства и восстанавливаются далеко не все.

Глубокая модификация глобальных моделей «Мир-2» и «Мир-3» была осуществлена группой исследователей под руководством В.М. Матросова [15, 16]. Вдобавок к традиционным компонентам модели «Мир-2» в нее были введены новые переменные, такие как научно-технический прогресс, политическая напряженность и биомасса растительности, влияющие на перераспределение капитала в пользу восстановления невозобновляемых ресурсов, борьбу с загрязнениями и коррекцию сельскохозяйственного капитала в трактовке В.Н. Егорова. Оптимизационная процедура в модели не использовалась. Тем не менее, с использованием только функциональных связей между компонентами были получены устойчивые стационарные состояния глобальной модели. Достоинством принятого в модели алгоритма достижения этого состояния является учет причинно-следственной связи между научно-техническим прогрессом, политической напряженностью и экономическими и экологическими переменными, а недостатком – принятие гипотезы о возможности, по крайней мере в ближайшие десятилетия, массового восстановления невозобновляемых ресурсов, за исключением редких металлов.

Еще одна, пожалуй, наиболее интересная модификация модели «Мир-2» была выполнена С.А. Маховым [17]. В ней, как и в работе В.А. Егорова, часть капитала направляется на восстановление ресурсов и борьбу с загрязнениями, но управления сельским хозяйством не даны. Функции управления U_R и U_Z не считаются функциями времени. Для их определения модель «Мир-2» дополняется уравнениями:

$$\frac{dU_R}{dt} = \frac{G_R(R_R) - U_R}{T_{UR}}, \quad (4)$$

$$\frac{dU_z}{dt} = \frac{G_z(Z_s) - U_z}{T_{UZ}}. \quad (5)$$

Здесь G_R , G_z – инвестиции в отрасли промышленности по восстановлению невозобновляемых природных ресурсов и очистке среды обитания от загрязнений; R_R , Z_s – доля оставшихся ресурсов и относительного загрязнения – переменные модели «Мир-2»; T_{UR} , T_{UZ} – времена выбытия основных фондов соответствующих отраслей производства.

Был найден вид функций $G_R(R_R)$ и $G_z(Z_s)$, гарантирующих существование устойчивых стационарных состояний Мировой системы, и определены их параметры. В частности установлено, что $G_R(R_R)$ являются гиперболическими функциями, а $G_z(Z_s)$ – линейными. Интегрирование уравнений модифицированной модели «Мир-2» проводилось на временном интервале с 1900 по 2200 г. Установлено, что выход системы на стационарный режим происходит до 2150 г. Установлено также, что существуют «хорошие» стационарные решения при $G_z = 0$, то есть в отсутствие очистки загрязнений. Показано, что такие стационары возможны только в случае, если отрасли производства, ориентированные на восстановление ресурсов и борьбу с загрязнениями, начнут функционировать не позднее 2030 г. К сожалению, такие светлые перспективы развития Мировой системы получены все в том же предположении, что капитал вновь создаваемых отраслей производства в XXI в. должен быть сравним с капиталом всех традиционных отраслей экономики.

2. ЦИКЛИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ – ЕСТЕСТВЕННЫЙ ПРОЦЕСС ЭВОЛЮЦИИ ЦИВИЛИЗАЦИИ

2.1. Явление цикличности в популяционной экологии

С позиций демэкологии предсказываемая моделью «Мир-2» и «Мир-3» цивилизационная катастрофа не выглядит фатальной. Существуют два типа роста численности популяций: J - и S -образные кривые роста [20]. При J -образной форме кривой численность вначале увеличивается по экспоненциальному закону, но затем, когда начинает действовать сопротивление окружающей среды, рост популяции резко прекращается. Популяция исчерпывает свои ресурсы. Размножение особей заканчивается, их смертность увеличивается. Численность популяции падает, и возникают ее релаксационные осцилляции (рис. 2, A_1 , A_2). У многих высокоорганизованных животных, обладающих сложными и длительными циклами индивидуального развития, численность популяции изменяется по S -образной кривой. Она вначале растет, а затем испытывает затухающие колебания относительно некото-

рого положения равновесия (рис. 2, В-2, В-3). Таким положением является максимальная численность популяции, которую может поддерживать окружающая среда (рис. 2, В-1).

Осцилляции численности животных могут возникать по двум причинам [20]. Первая из них состоит в том, что питательные вещества и другие необходимые для жизни факторы были накоплены еще до того, как начался S -образный рост популяции. Организмам временно хватает ресурсов для того, чтобы «перескочить» через предельную численность, которую может постоянно поддерживать окружающая среда. Вторая причина связана с разрывом по времени между увеличением численности организмов в результате повышенной рождаемости в благоприятных условиях и проявлением тормозящего влияния среды на возникновение перенаселения. Временной лаг при этом приблизительно равен периоду полового созревания особей. Такой лаг позволяет «перескочить» через предельную численность, которую может постоянно поддерживать окружающая среда.

Но причины, вызывающие осцилляции численности популяций животных, по-видимому, свойственны и человечеству. Как составная часть животного мира, человек не может существовать вне биосферы и должен подчиняться действующим в ней законам природы. Ставшая возможной благодаря развитию производительных сил общества добыча ископаемого углеводородного топлива, доступных для разработки руд, агрохимического и химического сырья, образовавшихся на протяжении геологических эпох, сегодня обеспечивают рост материальных благ и, тем самым, численности населения выше предельной численности, которую может постоянно поддерживать окружающая среда.

Подтверждение сказанному находим у классика экологии Ю. Одума (Eugene P. Odum): «У человека, по-видимому, имеются две основные возможности. Первая состоит в том, чтобы допустить неограниченный рост населения, который будет продолжаться до тех пор, пока плотность не превысит известные пределы (пища, ресурсы, пространство, загрязнения и т.п.). После этого большому числу людей придется погибнуть или влачить очень жалкое существование до тех пор, пока не снизится плотность (или не повысится порог, если это окажется возможным). **Если в этот момент не ввести контроль, могут произойти дополнительные взрывы численности** (рис. 3). Другая возможность – признать, что на самом деле эта гибель вызвана перенаселением. Если человек примет на себя ответственность, появится возможность заранее предсказать пределы, принять меры по регулированию численности (контроль рождаемости, ограничение земле- и водопользования, охрана и возобновление ресурсов, снижение экономических «сти-

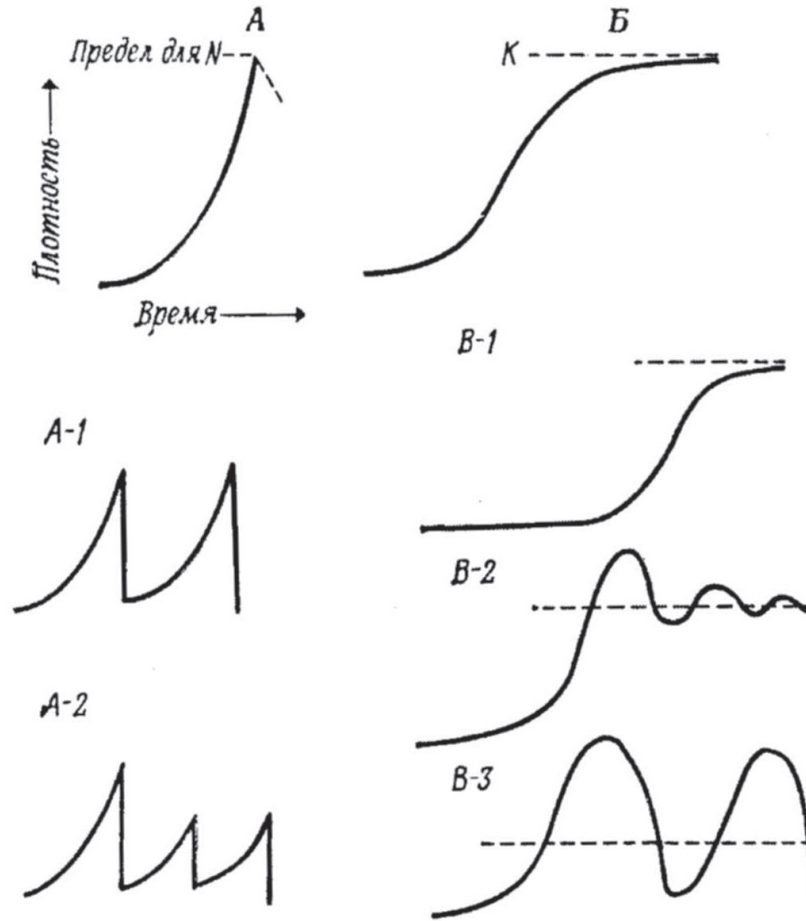


Рис. 2. Некоторые типы кривых роста популяций [20].

J-образная кривая, экспоненциальный рост (А), S-образная кривая, логический рост (В) и некоторые их разновидности



Рис. 3. Динамика численности популяции австралийской листоблошки *Cardiaspina albiflora*, кормящейся на эвкалиптах *Eucalyptus blakelyi* [20]. В норме плотность популяции при совместном влиянии не зависящих и зависящих от плотности факторов (погода, паразиты, хищники) стабилизируется на низком уровне; однако временами популяция «ускользает» от этой естественной регуляции и «вырывается» на более высокий уровень плотности

мулов роста” и т.д.), с тем чтобы плотность осталась заметно ниже критической» [20, с. 648].

2.2. Оценка критической численности населения Земли

В основе такой оценки лежит биосферная концепция развития цивилизации, предложенная В.Г. Горшковым и К.Я. Кондратьевым [8, 13]. Концепция основана на теории естественной биологической регуляции. Ее авторы считают, что биосфера обладает свойством устойчивости, то есть способностью компенсировать любые возмущения, вызванные хозяйственной деятельностью человека, до тех пор, пока потребление человеком продукции биоты не достигнет 1%. Остальные 99% продукции биота затрачивает на стабилизацию среды обитания. Однопроцентный порог допустимого возмущения биосферы, по оценке авторов концепции, был превышен еще в начале XX в. В последние десятилетия человечество непосредственно использует 6–8% продукции, генерируемой биотой. Кроме того, 30–32% годовой продукции «девственной» биоты человечество потребляет косвенным путем: в промышленном производстве, за счет замены естественных биоценозов агроценозами, урбанизации и опустынивания территорий и т.д. [13].

Критическая численность населения Земли может быть оценена на основании величины первичной продукции биосферы, применения закона «10%» Линдемана-Одума и определения нормы питания населения.

Существует несколько оценок величины первичной продукции биосферы. По Ю. Одуму, валовая продукция биомов суши составляет $57,4 \cdot 10^{16}$ ккал/год, морских биомов – $43,6 \cdot 10^{16}$ ккал/год [20]. Принимая энергетическое содержание наземных растений равным 4,5 ккал на 1 г сухого вещества, получим валовую продукцию биомов суши равной $127 \cdot 10^9$ т сухого вещества в год, а морских биомов – $97 \cdot 10^9$ т. Приблизительные оценки чистой продукции для биомов суши и океана составляют $63 \cdot 10^9$ и $48 \cdot 10^9$ т сухого вещества в год соответственно.

Согласно оценке Виттекера и Лайкенса, чистая первичная продукция биосферы равна $164 \cdot 10^9$ т сухого органического вещества в год (взято из [5]). Виттекер приводит оценку $170 \cdot 10^9$ т сухого органического вещества в год; из них $115 \cdot 10^9$ т продуцируют экосистемы суши и $55 \cdot 10^9$ т – морские и океанические экосистемы (взято из [23]). Ф. Ромад считает эти оценки завышенными и отдает предпочтение последним оценкам Р. Дювинью, согласно которым чистая первичная продукция биосферы равна $83 \cdot 10^9$ т сухой массы в год: $53 \cdot 10^9$ т – для наземных биомов и $30 \cdot 10^9$ т – для океанов [23]. С учетом этого для определения критической численности населения воспользуемся данными Р. Дювинью, достаточно близкими к оценкам Ю. Одума.

Критической численности соответствует достаточно низкий уровень развития мировой социально-экономической системы. Поэтому косвенное потребление первичной продукции биосферы (промышленное и т.д.) в первом приближении можно не учитывать, а ограничиться оценкой потребления продукции только для питания населения. Питание обеспечивается, главным образом, сельскохозяйственными культурами ($25\text{--}1000$ ккал/м² в год) и, в меньшей степени, собирательством ($0,2\text{--}10$ ккал/м² в год [20]). Поэтому будем рассматривать только продукцию наземных биомов ($53 \cdot 10^9$ т сухого вещества в год).

Применим закон Линдемана-Одума к компонентам трофической цепи «первичные продуценты–растительноядные консументы–люди». Согласно этому закону, на выходе звена трофической цепи остается только 10% энергии, поступившей на его вход. Остальные 90% рассеиваются в окружающую среду в процессах экологического метаболизма. Первичная продукция, равная $53 \cdot 10^9$ т сухого вещества в год, эквивалентна $2,385 \cdot 10^{17}$ ккал/год. Таким образом, с учетом принятых допущений однопроцентный порог допустимого возмущения биосферы составляет $2,385 \cdot 10^{15}$ ккал/год.

Хлебный эквивалент годового прожиточного минимума человека оценивается величиной 230 кг зерна [11]. Это соответствует 770000 ккал/год (2110 ккал/сут). Нормы питания зависят от возраста и вида трудовой деятельности индивида. В среднем требуется (ккал/сут): для детей до 1 года – 700–900; от 1 года до 3 лет – 1000–1300; от 3 до 8 лет – 1500–1900; от 8 до 10 лет – 2000–2400; для подростков – 2500–3500; для лиц, не занятых физическим трудом, – 3000; для рабочих механизированного труда – 3500; для людей, занятых тяжелым физическим трудом, – 4000–5000 [6]. С учетом возрастной и трудовой дифференциации населения в качестве средней нормы питания человека принимаем 3800 ккал/сут или 1387000 ккал/год.

Критическая численность населения, которую может постоянно поддерживать биосфера, определяется как частное от деления однопроцентного уровня ее первичной продукции на среднюю норму питания. Получим, что она составляет 1,73 млрд человек.

2.3. Ресурсно-энергетический потенциал Земли

Ресурсно-энергетическим потенциалом, по аналогии с земельно-ресурсным, будем называть одну из составляющих природно-ресурсного потенциала. Это доступная при существующих технологиях и социально-экономических отношениях совокупность энергетических ресурсов планеты. Потенциал включает в себя возобновляемые и невозобновляемые энергоресурсы и возрастает в процессе развития цивилизации.

В палеолите энергоснабжение человечества происходило за счет возобновляемых ресурсов девственной биосферы в ходе охоты, собирательства и сжигания растительной биомассы. Численность населения планеты в среднем палеолите оценивается в 200–300 тыс. человек. Для этого этапа развития общества характерно использование огня для обогрева и приготовления пищи (около 40% общего энергопотребления). Но эта энергия не могла полностью компенсировать затраты на поддержание гомеостатических температурных констант организмов [18].

В неолите и бронзовом веке энергетические возможности цивилизации существенно возросли. В это время формировалась традиционная сельская цивилизация, в которой основным видом деятельности стало земледелие и скотоводство. Около 10 тыс. лет назад численность населения Земли достигла 5 млн человек.

В рабовладельческом и феодальном обществах стала использоваться кинетическая энергия ветра и воды. Ко времени образования Римской империи численность жителей планеты достигла 150 млн человек, а к 1650 г. – 500 млн [23].

В индустриальную эпоху, с изобретением паровой машины, двигателя внутреннего сгорания, турбин, электрогенераторов и электромоторов, энергоснабжение цивилизации происходит, главным образом, за счет ископаемого углеводородного топлива. Скорость добычи топливных ресурсов возрастает. Вместе с энерговооруженностью цивилизации по экспоненте возрастает и численность населения Земли, которая на 1 января 2016 г. достигла 7,3 млрд человек.

В постиндустриальную эпоху предполагается наряду с развитием атомной энергетики осуществить

управляемую термоядерную реакцию и, таким образом, навсегда решить проблему энергоснабжения цивилизации. Возникает вопрос: по какому закону в этом случае будет изменяться численность населения?

Развитие производительных сил общества лимитируется природными ресурсами в соответствии с законом падения природно-ресурсного потенциала. Согласно этому закону, в пределах одной общественно-экономической формации и одной технологии природные ресурсы становятся все менее доступными и требуют увеличения энергетических затрат на их добычу [23]. Развитие производительных сил происходит относительно плавно до момента резкого истощения природно-ресурсного потенциала. Далее наступает экологический кризис, который разрешается путем революционного изменения производительных сил (научно-технической и промышленной революции). Вербальная модель ограниченности экономического роста обычно иллюстрируется S-образной (логистической) кривой, показывающей, как экспоненциальный рост постепенно сменяется асимптотическим стремлением к некоторому предельному состоянию экономики, свойственной данной социально-экономической формации.

Э.А. Араб-Оглы предложил использовать последовательность логистических моделей энерговооруженности человечества для построения вербальной модели ее экспоненциального роста [2, с. 211]. У этой модели есть три недостатка.

Первый из них состоит в том, что в один ряд поставлены логистические модели падения ресурсно-энергетического потенциала возобновляемых и невозобновляемых ресурсов (рис. 4).

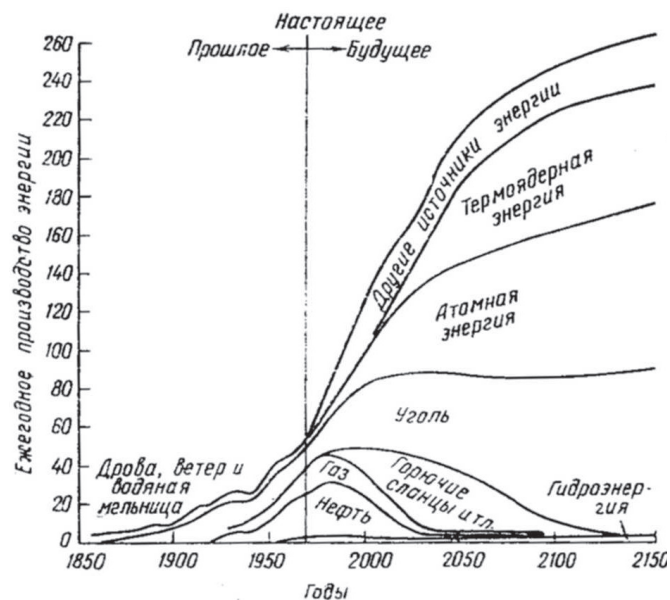


Рис. 4. Экспоненциальный рост производства энергии как сумма логистических кривых, относящихся к различным источникам ее потребления [2]. Шкала слева обозначает лишь порядок величин, а не физические единицы

Полемизируя с авторами глобальных моделей «Мир-2» и «Мир-3», Э.А. Араб-Оглы пишет: «Не требуется особого математического воображения, чтобы убедиться в том, что экспоненциальный рост агрегатных показателей может продолжаться несравненно дольше, чем рост отдельных составляющих ее величин, экспонента при этом складывается из ряда логистических кривых. Подтверждением может служить, например, экспоненциальный рост производства энергии, выходящий далеко за пределы обозримого будущего и складывающийся из последовательного вовлечения в него механической энергии человека и животных, энергии ветра, гидроэнергии, тепловой энергии, получаемой при сжигании дров, угля, нефти и газа, атомной и термоядерной энергии. И этот довод еще более правомерен в отношении таких экономических показателей, как валовый национальный продукт, национальный доход на душу населения, производительность труда и т.п.» [2, с. 210–211].

Но ведь химическая энергия живого вещества образуется из световой энергии в процессе фотосинтеза, движется по трофической сети до человека, усваивается им и выводится в окружающую среду в процессах экологического метаболизма. Именно энергия пищи обеспечивает жизнедеятельность человечества на всех этапах его развития. И она ограничена продукционной способностью биосферы. Эта важная особенность жизни учитывается в моделях «Мир-2» и «Мир-3». В качестве энергетических компонент в них по отдельности рассматриваются энергия пищи и невозобновляемые ресурсы – потенциальная энергия индустрии.

Второй недостаток состоит в недооценке запасов сланцевой нефти и переоценке запасов угля. Логистическую кривую «уголь» следует именовать «сланцы», а кривую «сланцы» именовать «уголь».

Третий недостаток модели экспоненциального роста энерговооруженности состоит в том, что после овладения человечеством управляемой термоядерной реакцией она косвенно отменяет закон падения природно-ресурсного потенциала. Справедливости ради заметим, что на рис. 4 автор застенчиво «заворачивает» энергетическую экспоненту в сторону логистической кривой. Нельзя же заечь на Земле второе Солнце.

Еще одно замечание касается реализованной в модификациях моделей «Мир-2» и «Мир-3» идеи восстановления невозобновляемых природных ресурсов. Авторы этой идеи «забыли», что ресурсы включают не только вещественную, но и энергетическую составляющую. При этом для получения вторсырья тоже затрачивается энергия. Невозобновляемые топливные ресурсы включают: углеводородное топливо, содержащее химическую энергию, образовавшуюся в процессах фотосинтеза и ассимиляции пищи консументами в прошедшие геологические эпохи; ядерное топли-

во, представляющее собой «пепел» давно сгоревших звезд, когда «легкие» атомы, соударяясь друг с другом, образовали атомы урана; водородное топливо, старейшее из видов горючего, представляющее собой «пепел» Большого взрыва (теория Г.А. Гамова).

В соответствии с одной из формулировок второго начала термодинамики процессы, связанные с превращением энергии, могут происходить самопроизвольно только при условии, что энергия переходит из концентрированной формы в рассеянную. Ископаемое топливо обладает низкой энтропией, а содержащаяся в нем энергия – высоким «качеством», поскольку она пригодна для совершения работы. Горение топлива представляет собой самопроизвольный процесс, в ходе которого происходит рассеяние энергии (увеличение энтропии) и понижение ее «качества». В соответствии с законом фундаментальной асимметрии природы, переход из низкокачественной энергии в высококачественную невозможен. Поэтому невозможно восстановление ископаемых топливных ресурсов. Задача цивилизации – научиться экономно распоряжаться «высококачественной» энергией или, что то же самое, снижать уровень производства энтропии.

2.4. Начальные запасы ресурсов в моделях «Мир-2» и «Мир-2 MathCad»

Для подтверждения гипотезы Ю. Одум о возможности циклического развития цивилизации воспользуемся алгоритмом модели «Мир-2». Публикация этого алгоритма в монографии [32] и его программная реализация на языке автоматического программирования DYNAMO упростила повторную реализацию модели на языке MathCad [29]. Будем в дальнейшем называть эту реализацию «Мир-2МС». Ее идентификация осуществлялась путем сравнения результатов решения задачи с базовым вариантом модели «Мир-2» (рис. 1). Сопоставление решений на временном интервале 1900–2100 гг. показало их идентичность.

В модели «Мир-2» невозобновляемые природные ресурсы не подразделяются на топливно-энергетические и неэнергетические минеральные ресурсы, а при задании их первоначальных запасов R_0 (начальных условий для переменной R) используется относительный принцип. Единицей ресурсов (ресурсной единицей, РЕ) считается их годовое потребление в «базовом» 1970 г. При этом предполагается, что ресурсов при той скорости их потребления, какая была в 1970 г., должно хватить на 250 лет. Остается неясным, каким способом осуществлялась интегральная оценка запасов многочисленных неэнергетических ресурсов: распространенных и редких металлов, агрохимического и химического сырья, строительных материалов.

Неопределенность интегральной оценки запасов неэнергетических ресурсов и первостепенная важность горючих ископаемых как источников энергообеспечения послужили аргументами для пересмотра принятого в модели «Мир-2» начального условия « $R_0 = 9 \cdot 10^{11}$ РЕ».

В базовых сценариях, реализованных на модели «Мир-2МС», при задании R_0 учитывались мировые запасы нефти, газа и угля, объединяемые понятием «традиционные топливно-энергетические ресурсы». Их запасы достаточно изучены, периодически пересматриваются и выражаются в энергетических единицах (в системе СИ – в джоулях). Кроме того, предусматривается возможность гипотетического увеличения топливных ресурсов за счет перспективных источников: горючих сланцев, битумных песков, атомной и термоядерной энергетики. Для сохранения связи с моделью «Мир-2» будем по-прежнему полагать 1970 г. базовым, а ресурсной единицей (РЕ) считать их годовое потребление в «базовом» году. Численные значения РЕ получены с графиков на рис. 5, 6. Графики использовались также для идентификации модели «Мир-2МС».

При формулировке сценариев развития цивилизации принципиальное значение имеет алгоритм вычисления периода истощения топливных ресурсов. Он состоит в следующем. Последовательно рассматрива-

ются следующие виды ресурсов: нефть; нефть + газ = подвижные углеводороды; подвижные углеводороды + уголь = традиционные топливные ресурсы; традиционные топливные ресурсы + сланцевые нефть = углеводородное топливо; традиционные топливные ресурсы + атомная и термоядерная энергетика = топливные ресурсы будущего.

Введем обозначения: $R_m, R_n; V_m, V_n; \tau_m, \tau_n$ – запасы, скорости потребления, периоды истощения m -го и n -го видов ресурсов соответственно; $R_{\Delta n}$ – количество n -го ресурса, потребленное за время истощения m -го ресурса; $R_{\Delta n}$ – остаток n -го ресурса после истощения m -го; V_{Σ} – скорость потребления n -го ресурса после истощения m -го; τ_s – период истощения n -го ресурса после исчезновения m -го. Тогда:

$$\tau_m = R_m / V_m$$

$$R_{\Delta n} = V_n \times \tau_m$$

$$R_{\Delta n} = R_n - R_{\Delta n} \tag{6}$$

$$V_{\Sigma} = V_m + V_n$$

$$\tau_s = R_{\Delta n} / V_{\Sigma}$$

$$\tau_n = \tau_m + \tau_s$$

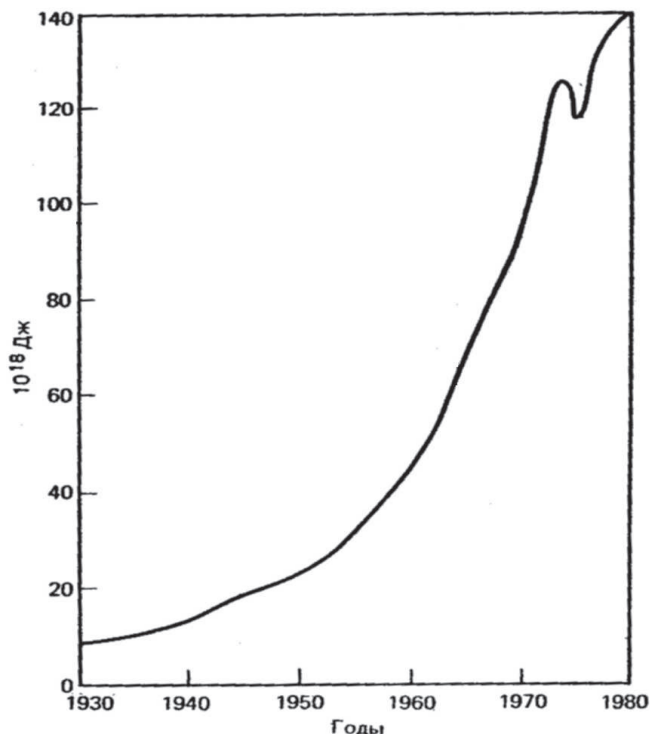


Рис. 5. Мировая добыча нефти (по данным ООН и Горного бюро США) [31]. Расчетная величина коэффициента теплотворной способности – $9 \cdot 10^9$ Дж/барр

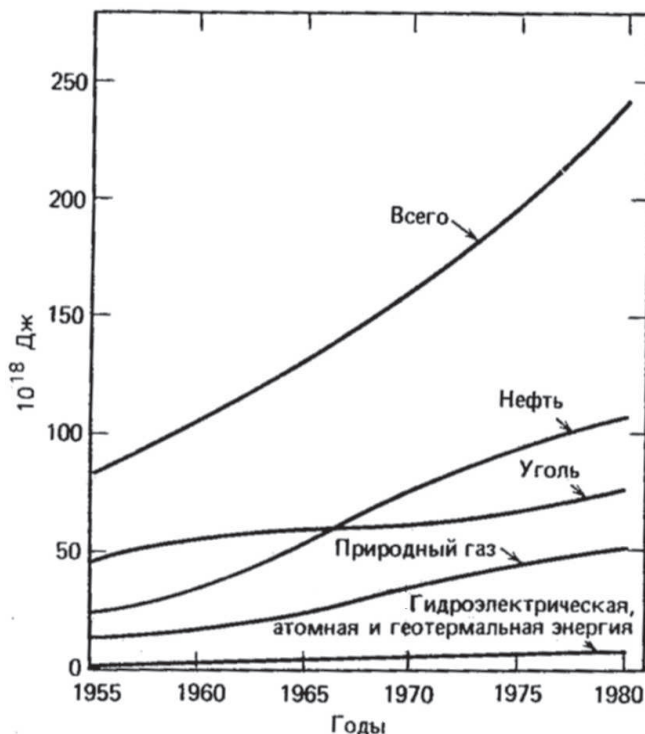


Рис. 6. Мировое потребление различных источников энергии (по данным ООН) [31]

Введем обозначения: $R_0 = 9 \cdot 10^{11}$, R_0^* (РЕ – начальные условия для невозобновляемых ресурсов в моделях «Мир-2» и «Мир-2МС» соответственно); $\tau_m = 250$, τ_n^* (годы – периоды исчерпания ресурсов в тех же моделях). Для определения R_0^* решаем пропорцию:

$$R_0 / R_0^* = \tau_m / \tau_n^* \quad (7)$$

Одну из наиболее авторитетных и близких по времени к базовому 1970 г. оценку извлекаемых запасов нефти и газа дала Всемирная энергетическая конференция 1980 г. [31]. Если принять теплотворность нефти равной 44 МДж/кг, газа – 40,8 МДж/м³, угля – 29,4 МДж/кг, то запасы нефти оцениваются в $R_{1980}^{(нефть)} = 1,5 \cdot 10^{22}$ Дж, газа – в $R_{1980}^{(газ)} = 1,1 \cdot 10^{22}$ Дж, угля – в $R_{1980}^{(уголь)} = 21 \cdot 10^{22}$ Дж.

Для получения оценок, близких к 1900 г., проинтегрируем график добычи нефти (рис. 5) на временном интервале 1930–1980 гг., а графики добычи газа и угля (рис. 6) – на интервале 1955–1980 гг. Получим: $\Delta R^{(нефть)} = 0,25 \cdot 10^{22}$ Дж, $\Delta R^{(газ)} = 0,07 \cdot 10^{22}$ Дж, $\Delta R^{(уголь)} = 0,23 \cdot 10^{22}$ Дж. Тогда мировые запасы подвижных углеводородов в 1900 г. оцениваются: $R_{1900}^{(нефть)} \approx 1,75 \cdot 10^{22}$ Дж, $R_{1900}^{(газ)} \approx 1,2 \cdot 10^{22}$ Дж.

При скоростях потребления в 1970 г. для нефти – $0,95 \cdot 10^{20}$ Дж/год и для газа – $0,35 \cdot 10^{20}$ Дж/год их запасов хватило бы на 184 и 343 года соответственно. Если предположить, что газ будет потребляться с прежней скоростью и заменит нефть после того, как ее запасы будут исчерпаны, то, в соответствии с формулами (6) и (7), подвижные углеводороды иссякнут через 227 лет и $R_0^* = 11,1 \cdot 10^{11}$ РЕ. Заметим, что эта оценка близка к принятой в модели «Мир-2» ($9 \cdot 10^{11}$ РЕ).

По данным всемирной энергетической конференции, извлекаемые запасы всех видов угля оцениваются в 13800 млрд т. Однако эта оценка, по-видимому, завышена. «Р. Аверитт пришел к выводу, что добыча может достигать 7135 млрд т, что эквивалентно $21 \cdot 10^{22}$ Дж» (цитируется по [31, с. 59]). При этом извлекаемыми считаются запасы угля в пластах мощностью более 30 см,

залегающих на глубинах не более 2 км, с учетом того, что весь уголь из пласта извлечь невозможно, и извлечение на уровне 50% считается хорошим [31]. При скорости потребления угля в 1970 г., равной $0,6 \cdot 10^{20}$ Дж, запасов угля хватило бы на 3500 лет. Если предположить, что уголь заменит нефть и газ после того, как их запасы будут исчерпаны, а суммарная скорость потребления традиционного топлива останется прежней, то, в соответствии с формулами (6), (7), все топливо иссякнет через 1034 г., и $R_0^* = 37,2 \cdot 10^{11}$ РЕ. Таким образом, начальное условие в модели «Мир-2» было занижено в 4,16 раза.

Запасы нефти, газа и угля по состоянию на 2014 г., опубликованные в статистическом обзоре мировой энергетики 2015 (Statistical Review of World Energy 2015), оцениваются в 239,8 млрд т, 187,1 трлн м³, 891,5 млрд т соответственно. В энергетических единицах эти запасы составляют $L_{2014}^{(нефть)} = 1,06 \cdot 10^{22}$ Дж, $L_{2014}^{(газ)} = 0,76 \cdot 10^{22}$ Дж, $L_{2014}^{(уголь)} = 26,2 \cdot 10^{22}$ Дж.

Запасы ресурсов на 2014 г., вычисленные при скоростях их потребления, существовавших в 1970 г., составляют: $R_{2014}^{(нефть)} = 0,65 \cdot 10^{22}$ Дж, $R_{2014}^{(газ)} = 0,6 \cdot 10^{22}$ Дж, $R_{2014}^{(уголь)} = 25,41 \cdot 10^{22}$ Дж (при начальных запасах $R_{1900}^{(нефть)} = 1,75 \cdot 10^{22}$ Дж, $R_{1900}^{(газ)} = 1,2 \cdot 10^{22}$ Дж, $R_{1900}^{(уголь)} = 26 \cdot 10^{22}$ Дж).

Таким образом, невязка оценки $\Delta = L - R$ составляет: $\Delta^{(нефть)} = 0,41 \cdot 10^{22}$ Дж, $\Delta^{(газ)} = 0,16 \cdot 10^{22}$ Дж. Положительные невязки могут быть отнесены за счет открытых после 1980 г. новых месторождений подвижных углеводородов, например, Штокмановского. В любом случае, эти невязки лишь увеличивают значение R_0^* . Невязка для угля не вычислялась из-за десятикратного различия в оценках его запасов. Эти различия связаны, по-видимому, во-первых, с различными представлениями о рентабельности добычи угля, а во-вторых – с неопределенностью понятия «уголь» с точки зрения его теплотворной способности (бурый уголь – 15, каменный уголь – 22, антрацит – 29 МДж/кг).

Заметим, что подвижные углеводороды и уголь далеко не исчерпывают запасы горючих ископаемых (табл. 1).

Табл. 1

Потенциальные ресурсы горючих ископаемых [31]

Горючие ископаемые	Количество в недрах (10^{22} Дж)	Количество, которое может быть извлечено (10^{22} Дж)
Уголь	42	21
Нефть и газ	2,1	2,6
Запечатанная нефть (неподвижная)	2,5	0–?
Тяжелая нефть (битумные пески)	5,0	0,5–2,5
Нетрадиционный природный газ	10+	0,07–?
Горючие сланцы (более 40 л на 1 т)	200	1,0–?
Горючие сланцы (менее 40 л на 1 т)	10000	?
Мировое потребление нефти и газа в 1983 г.	0,018	
Мировое потребление энергии в 1983 г.	0,03	

Но основная часть этих запасов относится к потенциальным ресурсам, добыча которых нерентабельна при современных технологиях. В последние годы в США начата добыча сланцевой нефти (shale oil), получаемой из горючих сланцев. В 2011 г. ее добыча составила 1 млн баррелей в сутки (1 баррель нефти = 136,4 кг), а в 2013 г. – уже 3 млн баррелей. В 2014 г. на долю сланцевой нефти приходилось 4,3% мировой добычи нефти всех сортов (https://ru.wikipedia/wiki/сланцевая_нефть).

2.5. Модельные сценарии развития цивилизации при расширении ресурсно-энергетического потенциала за счет традиционных топливных ресурсов

При реализации сценариев в модели «Мир-2МС» приняты такие же начальные условия для компонент, как и в модели «Мир-2», за исключением условия для невозобновляемых ресурсов: $P_0 = 1,65 \cdot 10^9$ человек, $K_0 = 0,4 \cdot 10^9$ единиц капитала (принимается, что в 1900 г. на человека приходилось вчетверо меньше капитала, чем в 1970 г.); $X_0 = 0,2$; R_0^* – переменная величина, зависящая от сценария; $Z_0 = 0,2 \cdot 10^9$ единиц загрязнения (считается, что в 1900 г. на душу населения приходилось в 8 раз меньше загрязнений, чем в 1970 г.). В дальнейшем изложении надстрочный знак * при R_0 будем упускать.

Рассмотрим вначале четыре модельных сценария с фиксированными значениями ресурсно-энергетического потенциала Земли, соответствующими традиционным энергоносителям (нефть, газ, уголь). Первый сценарий будем связывать с современными оценками запасов подвижных углеводородов, которые при скорости их потребления, как в 1970 г., должны иссякнуть через 250 лет, то есть в 2150 г. Их запасы примем за 100%, а начальное условие будет $R_0 = 900 \cdot 10^9$ РЕ.

Второй сценарий соответствует перспективной ситуации, когда произойдет расширение ресурсно-энергетического потенциала за счет освоения ресурсов нефти и газа на шельфе и материковом склоне Мирового океана. Примем, что при этом запасы подвижных углеводородов увеличились до 150% и их хватит на 375 лет, то есть до 2275 г., а начальное условие – $R_0 = 1350 \cdot 10^9$ единиц ресурсов.

Третий сценарий соответствует ситуации, когда уголь заменит исчерпанные запасы подвижных углеводородов, но его добыча будет все же ограничена рентабельностью применяемых технологий. Примем, что при этом запасы топливных ресурсов увеличились до 300% и их хватит на 700 лет, то есть до 2600 г., а начальное условие – $R_0 = 2700 \cdot 10^9$ РЕ.

В четвертом сценарии требования к порогу рентабельности добычи угля понижены так, чтобы его за-

пасов хватило на 1000 лет, то есть до 2900 г., а начальное условие – $R_0 = 3600 \cdot 10^9$ РЕ.

Принятые сценарии нуждаются в пояснениях.

1. В модели «Мир-2» «Природные ресурсы – системный уровень. Он связан с одним потоком, уменьшающим его темпом потребления. В соответствии с принятым здесь определением, природные ресурсы включают в себя только невозобновляемые ресурсы и не включают, например, лес и другие ресурсы, которые могут возобновляться; последние классифицируются как часть сельскохозяйственного сектора» [32, с. 55].

Между тем, топливные ресурсы цивилизации представляют собой сумму R возобновляемых и невозобновляемых ресурсов. С учетом этого уравнение для ресурсов следовало бы записать в виде

$$\frac{dR}{dt} = V^+ - V^-,$$

где: V^+ – первичная продуктивность материковых экосистем (скорость, с которой видимое излучение Солнца усваивается фитопланктоном экосистем суши);

V^- – скорость потребления невозобновляемых топливных ресурсов цивилизацией.

Продуктивность материковых экосистем по сухому веществу оценивается в $53 \cdot 10^9$ т/год, что эквивалентно 10^{19} Дж/год. Скорость потребления традиционных невозобновляемых топливных ресурсов в «эталонном» 1970 г. составляла $1,9 \cdot 10^{20}$ Дж/год. Это на порядок больше, чем продуктивность экосистем суши. Разномасштабность скоростей V^+ и V^- позволяет записать ресурсное уравнение в виде

$$\frac{dR}{dt} \approx -V^-.$$

Тем самым продуктивность материковых экосистем в модели «Мир-2МС» рассматривается по умолчанию (неявно). Такой подход полезен при объяснении стационарного движения населения, когда ресурсы и численность населения выходят на постоянный уровень, и цивилизация живет за счет потребления возобновляемых ресурсов (при численности населения $P \leq 1,5$ млрд человек).

2. Продукты питания население получает с изъятых у «девственной» биосферы земель – сельхозугодий. Их продуктивность оценивается в $9,1 \cdot 10^9$ т/год [24]. Это в 5,8 раза меньше продуктивности экосистем суши. Поэтому принятое в концепции модели «Мир-2» равенство между сельскохозяйственной продукцией и возобновляемыми ресурсами материковых экосистем не соответствует действительности. Сельскохозяйственная продукция в модели «Мир-2МС» представляет собой лишь видимую долю возобновляемых ресурсов, учитываемых по умолчанию.

Результаты моделирования (рис. 7, 8; табл. 2) свидетельствуют о том, что при расширении ресурсно-энергетического потенциала в глобальной социально-экологической системе возникают осцилляции всех компонент. Осцилляций образуется тем больше, чем больше запасы доступных для эксплуатации природных ресурсов. При увеличении запасов до 150% по сравнению с «нормой» ($9 \cdot 10^{11}$ единиц ресурсов), принятой в модели «Мир-2»,

возникают две осцилляции численности населения; при увеличении запасов до 300% – три осцилляции; при увеличении до 400% – четыре осцилляции. Амплитуда осцилляции составляет 2–5 млрд человек. При этом время наступления максимума первой осцилляции численности существенно не изменится (2018–2033 гг.), а второй и третьей осцилляции – изменится в пределах 33 и 45 лет соответственно.

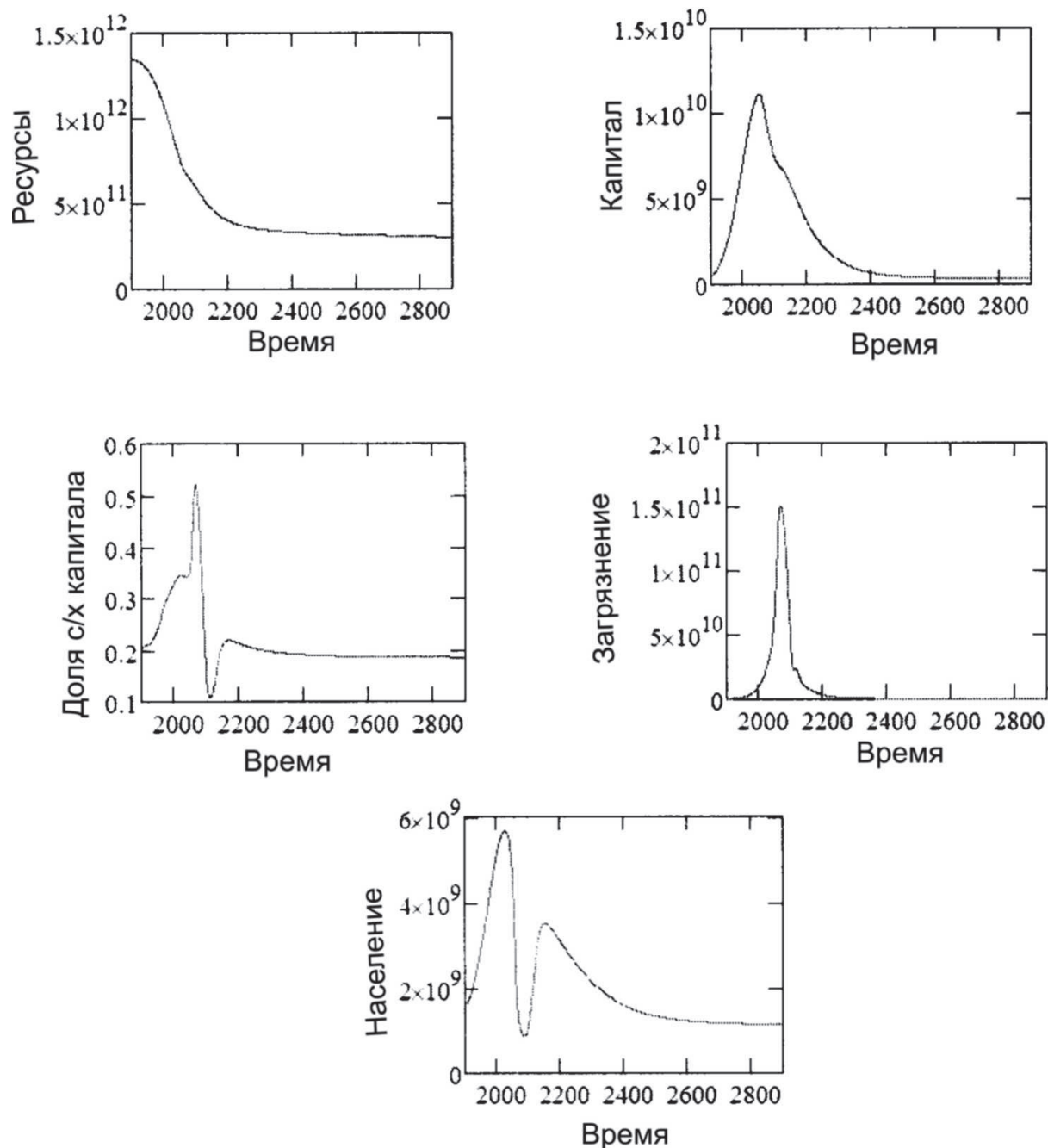


Рис. 7. Временная изменчивость компонент глобальной системы в модели «Мир-2 MathCad». Первоначальные запасы топливных ресурсов $R = 1350 \cdot 10^9$ единиц ресурсов; сценарий (150%). Условные единицы по осям ординат объяснены в тексте

Заметим, что число осцилляций загрязнения окружающей среды и доли сельскохозяйственного капитала всегда на единицу меньше числа осцилляций численности населения.

Невозобновляемые природные ресурсы не являются ограничителями роста численности населения. Его ограничивает дефицит сельскохозяйственной продукции и загрязнение окружающей среды. Эти факторы

постоянно действуют на всех временных интервалах падения численности населения. При этом экстремумы уровня загрязнения и доли сельскохозяйственного капитала запаздывают по отношению к экстремумам численности населения на одно-два десятилетия.

Основные фонды экономики во всех сценариях плавно снижаются, коррелируя со снижением запасов невозобновляемых ресурсов. Небольшие коле-

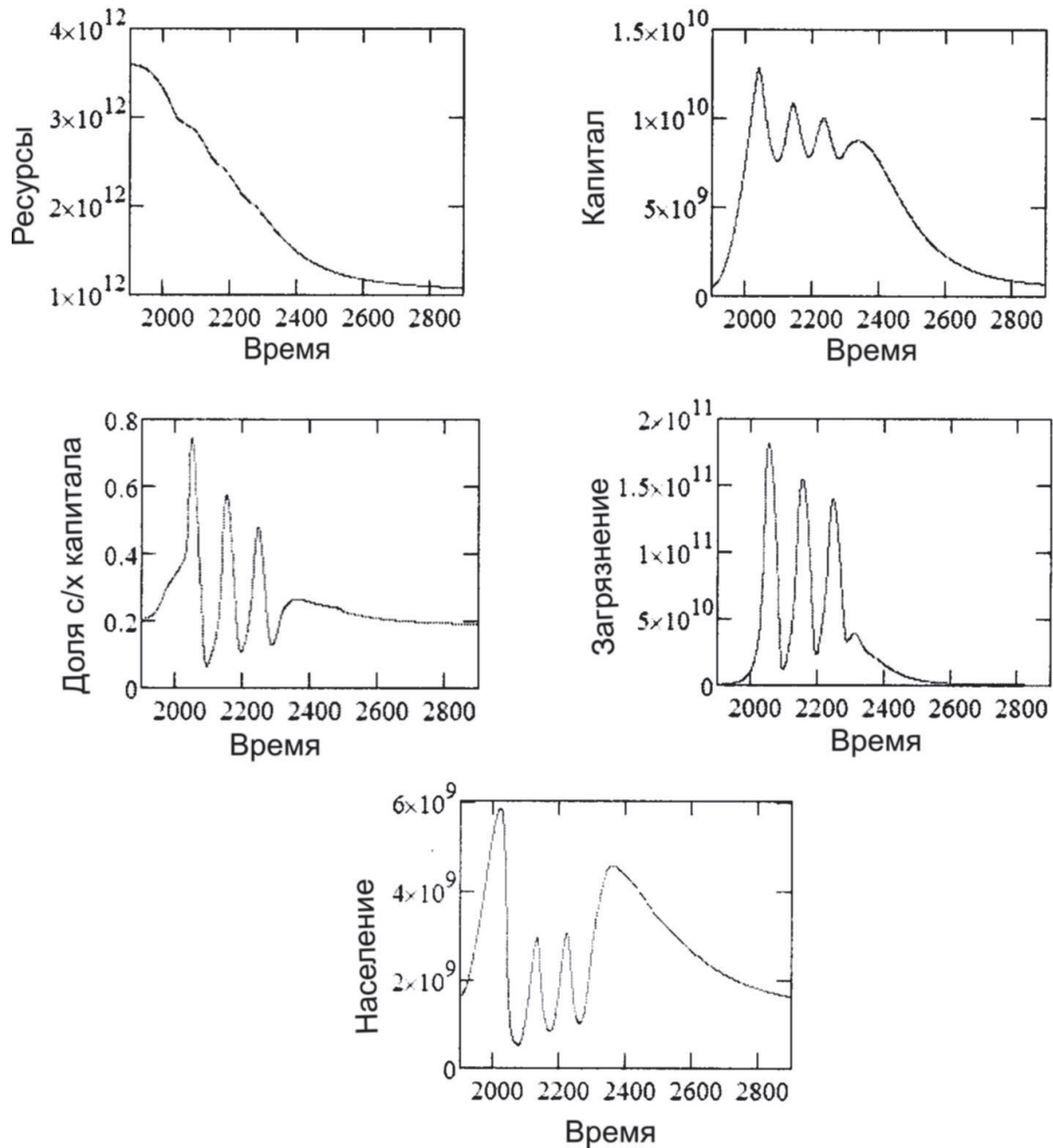


Рис. 8. Временная изменчивость компонент глобальной системы в модели «Мир-2 MathCad». Первоначальные запасы топливных ресурсов $R = 3600 \cdot 10^9$ единиц ресурсов; сценарий (400%). Условные единицы по осям ординат объяснены в тексте

Табл. 2

**Величины и годы экстремумов численности населения
в сценариях модели глобального развития «Мир-2МС» [29]**

% R к «норме»	Годы	Численность населения $P \cdot 10^9$	
		Min	Max
100	1900	1,65	5,29
	2022		
	2450	1,25	
150	1900	1,65	5,62
	2033		
	2084	0,87	
	2163		
	2600	1,26	
300	1900	1,65	5,81
	2021		
	2075	0,54	
	2132		
	2179	0,97	
	2271		
	2880	1,3	
400	1900	1,65	5,83
	2018		
	2075	0,51	
	2130		
	2170	0,83	
	2226		
	2265	1,01	
	2363		
2900	1,5		

Табл. 3

**Годы и уровни стабилизации компонентов мировой социально-экологической системы
в различных сценариях модели «Мир-2МС» [29]**

Сценарий	Год	Численность населения	Невозобновляемые природные ресурсы	Капитал	Доля с/х капитала	Уровень загрязнения среды
150%	2600	1,26	$3,10 \cdot 10^{11}$	$3,23 \cdot 10^8$	0,18	$2,77 \cdot 10^8$
300%	2880	1,30	$7,58 \cdot 10^{11}$	$4,82 \cdot 10^8$	0,18	$3,33 \cdot 10^8$
400%	2900*	1,50	$10,8 \cdot 10^{11}$	$6,96 \cdot 10^8$	0,19	$4,82 \cdot 10^8$

* На тысячелетнем временном интервале система не установилась полностью.

бания капитала запаздывают по фазе по отношению к колебаниям численности населения. Так отражается недостаток трудовых ресурсов на нисходящих ветвях циклов развития цивилизации.

В каждом из сценариев вслед за заключительной осцилляцией численности населения наступает этап стабилизации численности. В сценарии с ресурсно-энергетическим потенциалом, расширенным до 150%, это

происходит через 437 лет; в сценарии с расширением потенциала до 300% – через 609 лет; в сценарии с расширением до 400% – через 1000 лет. Стабилизация численности населения наступает на уровне приблизительно 1,3–1,5 млрд человек. Эта оценка, по-видимому, и является максимальной численностью, которую может постоянно поддерживать природная и генерируемая человечеством социально-экономическая среда.

Одновременно с численностью населения на стационарный режим выходят и другие компоненты системы (табл. 3).

В статье [41] мы нашли независимое подтверждение опубликованных нами ранее результатов модельных исследований [28–30], показавших возможность циклического развития и последующего выхода Мировой социально-экологической системы на стационарный режим. В этой интересной и значимой работе показано, что на основе классической модели Вольтерра-Лотка «хищник-жертва» с внутривидовой конкуренцией среди жертв можно получить нетривиальный вывод о циклическом характере развития цивилизации и последующем ее выходе на стационарный режим. Плодотворной оказалась идея отождествить среду обитания с «жертвами», а население – с «хищниками» и использовать модель Вольтерра для биологического сообщества n видов: продуцентов, консументов и субстратов (ресурсов). (Такая модель рассмотрена в монографии Ю.М. Свирижева, Д.О. Логофета [25, с. 130–169]). При этом авторы статьи отождествляют виды сообщества организмов с имущественной структурой человеческого общества («богачами» и «обывателями»). Рождаемость и смертность групп населения зависят от распределения продукции, которую создает «простой люд», а распределяет «элита». Авторы статьи показывают, что чрезмерная эксплуатация ресурсов и избыточное расслоение населения по доходам, независимо одно от другого, приводят к серии катастроф цивилизации, и открытым текстом говорят о необходимости выравнивать доходы населения и сокращать темпы расходования ресурсов.

2.6. Модельные сценарии развития цивилизации при расширении ресурсно-энергетического потенциала за счет перспективных топливных ресурсов

Сланцевая нефть

По современным представлениям, разработка сланцевого месторождения считается рентабельной, если содержание нефти в нем не менее 90 л/т сланца³. Мировые запасы сланца с рентабельной добычей нефти составляют 650 трлн т. Из них можно извлечь 26 трлн т нефти. Это в 13 раз больше мировых запасов подвижной нефти. При дефиците энергоресурсов порог рентабельности добычи сланцевой нефти может быть понижен до 40 л/т [31]. По данным Всемирной энергетической конференции (1980), запасы горючих сланцев с содержанием нефти выше 40 л/т оцениваются в $200 \cdot 10^{22}$ Дж. Это в 8,5 раза больше энергии, содержащейся в мировых запасах нефти, газа и угля.

Богатейшие месторождения горючих сланцев, расположенные в Эстонии, дают 320 л нефтепродуктов на 1 т сырья. Их разработка началась в 1915 г. За год было добыто 315000 т сланцевого масла. Многие годы производство нефти и газа из сланцев успешно велось в СССР и КНР⁴. В послевоенные годы Ленинград снабжался газом, добываемым из эстонских сланцев. Примем, что сланцевая нефть добывалась с 1900 г.

Будем полагать, что запасы ископаемого углеводородного топлива (традиционной нефти, газа, угля и сланцевой нефти) составляют $223,9 \cdot 10^{22}$ Дж (табл. 1). Теплотворность сланцевой нефти примем равной $44 \cdot 10^6$ Дж/кг, а ее добычу, вплоть до исчерпания традиционного топлива, примем такой же, как в 2013 г., – $1,1 \cdot 10^9$ барреля/год. В энергетических единицах это составляет $6,6 \cdot 10^{18}$ Дж/год. Если предположить, что сланцевая нефть заменит традиционные топливные ресурсы после того, как их запасы будут исчерпаны, и будет добываться со скоростью $1,97 \cdot 10^{20}$ Дж/год, то в соответствии с алгоритмом (6, 7) период исчерпания углеводородного топлива составит 10117 лет. Из пропорции (7) находим $R_0 = 36,4 \cdot 10^{12}$ РЕ. Полагая, что рентабельная добыча нефти из горючих сланцев с ее содержанием более 40 л/т сланцев составляет 28% мировых запасов, получим оценку $R_0 = 8 \cdot 10^{12}$ РЕ. Это в 8,9 раза больше запасов ресурсов, принятых в модели «Мир-2». Время исчерпания ресурсов в этом сценарии составляет 2220 лет, то есть их запасов хватит до 4120 г.

Рис. 9 иллюстрирует результаты реализации сценария эволюции Мировой системы при начальных запасах углеводородного топлива $8 \cdot 10^{12}$ РЕ (сценарий для 800%). Видно, что число осцилляций численности населения увеличилось до 15, а остальных компонент – до 14. Запасы углеводородного топлива убывают во времени по закону, близкому к кусочно-линейному с выходом на стационарный режим. Капитал экономики, достигнув максимума во второй осцилляции, испытывает затухающие колебания относительно своего тренда, имеющего высокую положительную корреляцию с убывающими запасами топливных ресурсов.

Загрязнение окружающей среды, достигнув в первых же осцилляциях максимальных значений, вызванных интенсивным ростом капитала экономики, снижает максимальную численность населения во второй и последующих осцилляциях до 2 млрд человек. Во избежание голодомора Мировая система вынуждена повысить долю сельскохозяйственного капитала до 0,9–0,8 от общего капитала экономики. Дальнейшая временная изменчивость доли сельскохозяйственного капитала и загрязнения окружающей среды соответствует поведению «осцилляторов с сухим трением». В теории колебания такие диссипатив-

³ vseonefti.ru/neft/slancevaya-neft.html

⁴ https://ru.wikipedia.org/wiki/Сланцевая_нефть

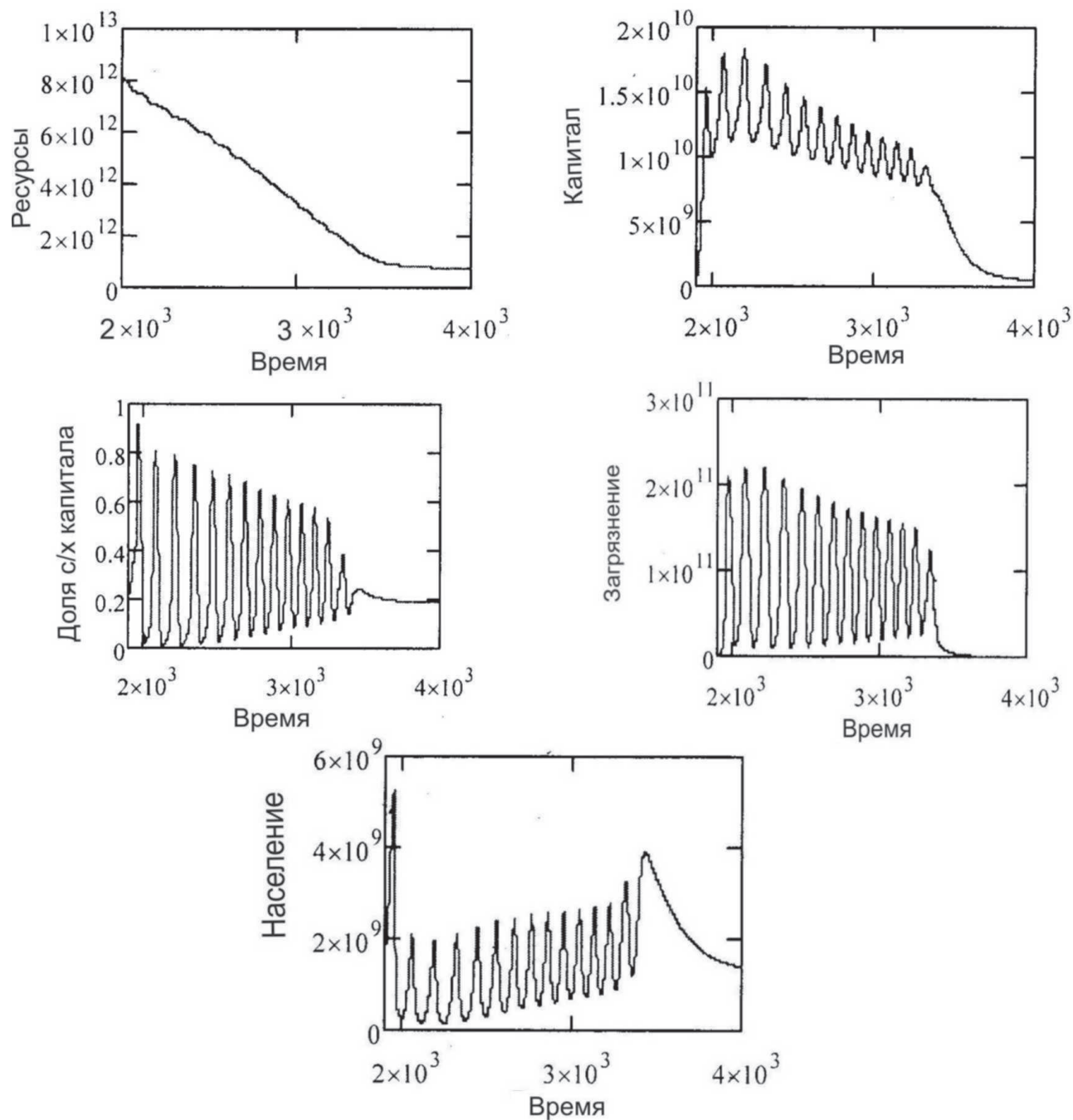


Рис. 9. Временная изменчивость компонент глобальной системы в модели «Мир-2МС». Первоначальные запасы традиционных топливных ресурсов и сланцевой нефти $R = 8 \cdot 10^{12}$ PE; сценарий 800%. Условные единицы по осям ординат объяснены в тексте

ные системы известны под названием осцилляторов с постоянным «кулоновским» трением. Роль трения в нашем случае выполняют убывающие топливные ресурсы и тесно связанный с ними капитал экономики, «притягивающие» компоненты системы к состоянию равновесия.

Численность населения, достигнув в первой осцилляции максимума в 5,6 млрд человек, во второй осцилляции рухнет до 2 млрд. Это чуть выше численности, которую может без ущерба для себя постоянно поддерживать биосфера. Дальнейшая временная изменчивость численности населения соответствует «системе с отталкивающей силой». Так в теории колебаний называется система, в которой действующая сила не притягивает, а отталкивает компонент от состояния равновесия. Роль отталкивающих сил выполняют уменьшающиеся во времени загрязнение окружающей среды и доли сельскохозяйственного капитала при весьма высоком капитале экономики.

Численность населения в завершающей осцилляции достигает второго по величине (относительного) максимума в 4 млрд человек, а период осцилляции является экстремально большим, достигающим 500 лет. Такие аномалии связаны с тем, что в это время загрязнение среды и сельскохозяйственное производство выходят на стационарный режим и не сдерживают рост численности населения. В то же время население реализует временной лаг рождаемости и постепенно переходит к стационарному движению с численностью 1,6 млрд человек, соответствующему допустимому порогу возмущения биосферы.

Термоядерная энергетика

Рассмотрим теперь сценарий эволюции цивилизации, предполагающий, что расширение ресурсно-энергетического потенциала будет происходить за счет термоядерной энергетике. Предпосылкой к его рассмотрению являются успехи в реализации управляемой реакции термоядерного синтеза, достигнутые в прошедшее десятилетие.

Сообщается⁵, что в Институте физики плазмы Китайской академии наук на экспериментальном реакторе «EAST» типа «Токамак» в 2007 г. был проведен первый в мире безубыточный, с точки зрения соотношения затраченная/полученная энергия (критерий Лоусона), термоядерный синтез. В данное время (2014 г.) это соотношение составляет 1/1,25, а в ближайшем будущем его планируется довести до 1/1,5.

На сайте общественно-политического журнала «Эхо России»⁶ и ряде других сайтов сообщается, что в Германии в Институте физики плазмы Макса Планка на экспериментальном термоядерном реак-

торе типа «Стеллатор» удалось добиться устойчивой термоядерной реакции с превышением выделенной энергии над затраченной.

Строительство международного экспериментального термоядерного реактора «ITER» планируется закончить в 2025 г. Ожидается, что первый промышленный термоядерный реактор будет построен в середине XXI столетия.

Учитывая сказанное, будем полагать, что использование термоядерной энергии в мировой экономике начнется в 2075 г. и будет возрастать по логистическому закону.

Логистическую модель роста энерговооруженности цивилизации R запишем в виде

$$\frac{dR}{dt} = (\alpha - \gamma R)R, \quad (8)$$

где: t – время;

$\alpha, \gamma > 0$ – параметры линейной зависимости r (коэффициент прироста энерговооруженности) от R :

$$r = \alpha - \gamma R.$$

Уравнение (8) имеет аналитическое решение [25]. Запишем его в виде:

$$R(t) = \frac{\alpha R_0 e^{\alpha t}}{\alpha + \gamma R_0 (e^{\alpha t} - 1)}, \quad (9)$$

где: R_0 – энерговооруженность цивилизации в начальный момент времени t_0 .

Энерговооруженность не возрастает беспредельно, а ограничена сверху:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = \alpha / \gamma. \quad (10)$$

При численной реализации сценария с расширением ресурсного потенциала за счет термоядерной энергетике в модель «Мир-2МС» внесены изменения, касающиеся уравнения для невозобновляемых топливных ресурсов. На временном интервале с 1900 по 2075 г. используется уравнение, принятое в модели «Мир-2» [32], а на последующем временном интервале – логистическая модель роста энерговооруженности. «Склепка» правых частей уравнений и их решений осуществляется непрерывным образом. При этом аналитическое решение (9) не используется, а логистическое уравнение (8) записывается в виде

$$\frac{dR}{dt} = r_0 \frac{(R_{\max} - R)}{(R_{\max} - R_0)} R, \quad (11)$$

и система уравнений пятого порядка модели «Мир-2МС» продолжает решаться методом Рунге-Кутты.

В уравнении (11) приняты следующие обозначения: $R_0 = 1,9 \cdot 10^{11}$ – запасы традиционных топливных ресурсов в 2075 г., принимаемые в качестве начального условия в логистической модели; r_0 – коэффициент прироста термоядерной энергии в момент времени $t_0 = 2075$; $R_{\max} = 21 \cdot 10^{11}$ PE – предел насыщения энер-

⁵ https://ru.wikipedia.org/wiki/Управляемый_термоядерный_синтез

⁶ ehorussia.com/new/node/11870

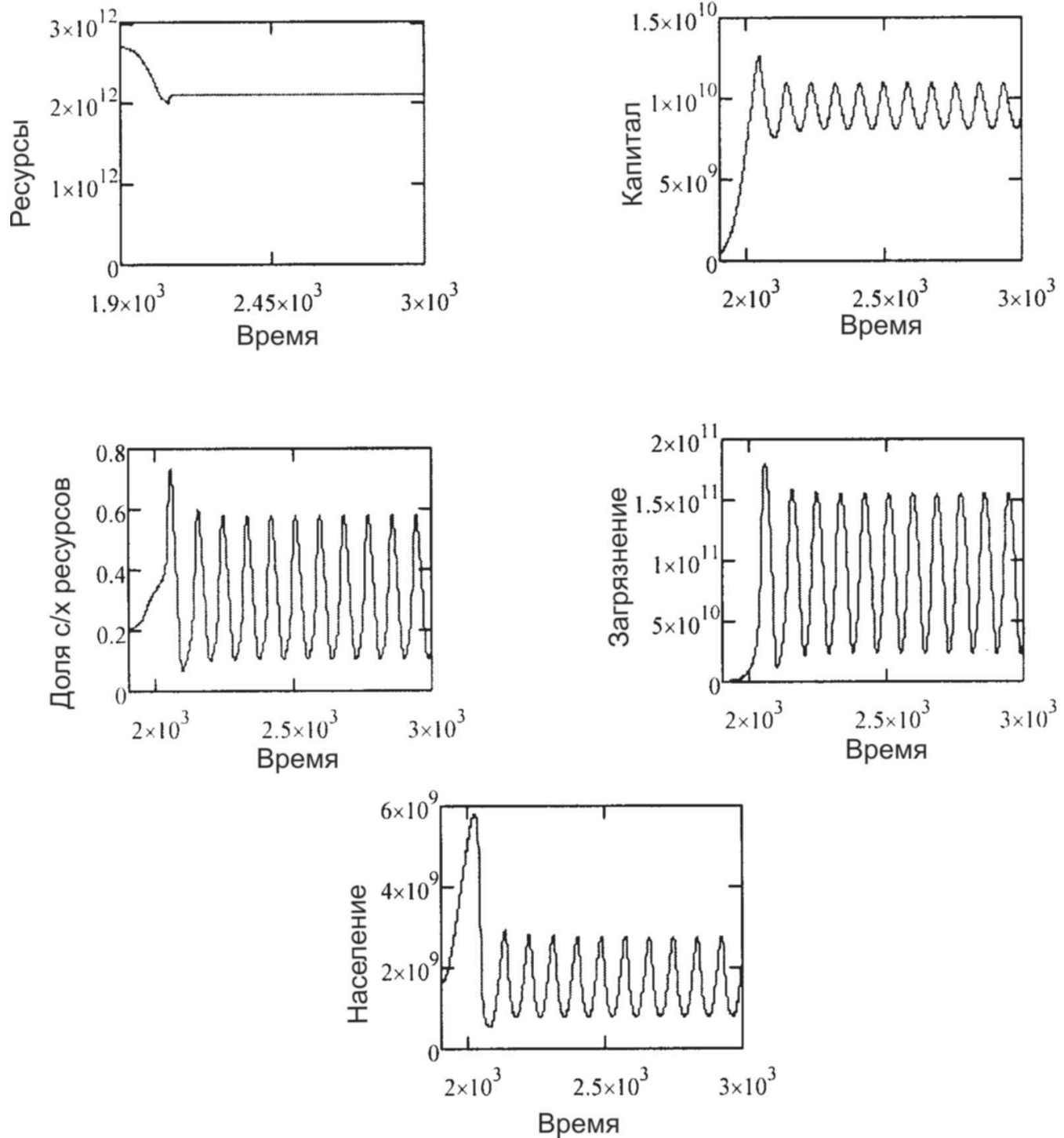


Рис. 10. Временная изменчивость компонент глобальной системы в модели «Мир-2МС». Первоначальные запасы топливных ресурсов $R = 27 \cdot 10^{11}$ PE; сценарий (300%). Начиная с 2075 г. текущие топливные ресурсы возрастают по логистической модели до постоянного уровня $21 \cdot 10^{12}$ PE за счет управляемой реакции термоядерного синтеза. Условные единицы по осям ординат объяснены в тексте

гией цивилизации, к которому асимптотически стремится решение уравнения (11).

Вывод правой части уравнения (11) с точностью до обозначений приводится в разделе 3.3 этой статьи.

Рис. 10 иллюстрирует результаты реализации сценария с термоядерной энергетикой. До 2075 г., на который приходится первое локально-устойчивое состояние для численности населения (см. рис. 12), цивилизация развивается в соответствии со сценарием $R_0 = 27 \cdot 10^{11}$ PE. В 2075 г., при текущих запасах традиционных топливных ресурсов, начинают работать промышленные реакторы управляемого термоядерного синтеза, увеличивающие по логистическому закону (11) энерговооруженность цивилизации до уровня $R_{\max} = 21 \cdot 10^{11}$ PE. По сценарию такой уровень будет поддерживаться неопределенно долго. На рис. 10 видно, что после 2075 г. все остальные компоненты модели переходят в режим работы гармонических осцилляторов. Компоненты совершают колебания постоянной амплитуды относительно своих устойчивых по Ляпунову стационарных движений. Это означает, что при широком использовании термоядерной энергетике цивилизацию ожидает бесконечная череда глубочайших экономических, экологических и демографических кризисов.

3. АЛЬТЕРНАТИВА ЦИКЛИЧЕСКОМУ РАЗВИТИЮ ЦИВИЛИЗАЦИИ

3.1. Концепция экологического доминирования человечества в биосфере

С таксономической точки зрения вид *Homo sapiens*, «человек разумный», принадлежит к царству животных и, следовательно, на него распространяется принятая в экологии концепция экологического доминирования [20, с. 185]. Согласно этой концепции из множества видов, составляющих биоценоз, лишь некоторые виды оказывают на него определяющее воздействие, обусловленное их численностью, трофическим уровнем, особенностями процессов экологического метаболизма и т. д.

Человек как биосоциальное существо не ограничился существованием в природной среде, где он, безусловно, доминирует. Он создал собственную окружающую среду, в которую, кроме природной, входят экономическая, социальная, техногенная и культурная среды. Возник производственный (социально-экономический) метаболизм, который слабо контролируется обществом и возрастает с развитием производства. Ассимиляционные способности (потребление возобновляемых и невозобновляемых природных ресурсов) и экономический катаболизм (загрязнение окружающей среды и деструкция природных ландшафтов) по мере роста производства разрослись до таких пределов, что подрывают природно-ресурсный потенци-

ал планеты. Человечество стало основной доминантой не только биоты Земли, но и биосферы. Силу доминирования человечества В.И. Вернадский сравнивает с геологическими силами, сформировавшими современный облик планеты [7]. Поэтому поиски пути к глобальному равновесию, основанные на ограничении производственного метаболизма без коррекции мощности его генератора, то есть численности населения, оказались безрезультатными.

Следует согласиться с точкой зрения К.Я. Кондратьева: «Если бы человечество вернулось в пределы хозяйственной емкости биосферы, то все экологические проблемы исчезли бы автоматически, прекратились бы антропогенные изменения окружающей среды. Для этого необходимо, однако, предпринять ряд мер, в особенности по стабилизации, а затем – сокращению численности населения планеты» [13, с. 37].

Осознавая невозможность в ближайшее время «перейти к глобальной стратегии сокращения численности населения», К.Я. Кондратьев ищет выход в восстановлении естественных сообществ биосферы. «Необходимо сократить площадь нарушенных человеком земель с 61% в настоящее время до 38%», то есть на 23% или на 3,2 млн км² [13, с. 38]. И это при условии, что на этой территории первичная биологическая продукция будет равна среднеглобальной. Но сокращение площадей земель, нарушенных цивилизацией, приведет к нарушению сложившегося социально-экономического метаболизма. Произойдет сокращение ассимиляционных возможностей человечества, что повлечет за собой сокращение его численности. Рассмотрим эту проблему подробнее.

Земельные ресурсы цивилизации

Площадь суши планеты равна $146 \cdot 10^6$ км². Из них пригодная для жизни по климатическим условиям площадь⁷ составляет $70,6 \cdot 10^6$ км². Площадь пашни оценивается в $15 \cdot 10^6$ км², а пастбищ – в $25 \cdot 10^6$ км², что составляет, соответственно, 21 и 35% территории суши, пригодной для жизни⁸. Площадь лугостепных экосистем оценивается в $9 \cdot 10^6$ км² [24]. Вычтем ее из общей площади пастбищ. Тогда на долю «рукотворных» пастбищ, образованных в результате ландшафтно-деструктивных воздействий, придется $16 \cdot 10^6$ км². С учетом этого общая площадь земель, изъятых у биосферы на нужды сельскохозяйственного производства, равна $31 \cdot 10^6$ км², что составляет 44% жизнепригодной территории суши.

Площадь урбанизированных территорий в 1980 г. равнялась $4,7 \cdot 10^6$ км². В 2007 г. она возросла⁹ до $19 \cdot 10^6$ км². Это составляет 27% жизнепригодной территории суши.

⁷ portaleco.ru/ekologija-goroda/istorija-i-perspektiva-urbanizacii.html

⁸ www.activestudy.info/zemelnye-resursy/

⁹ ru-ecology.info/temm/12651/

Таким образом, общая площадь нарушенных цивилизацией земель равна $50 \cdot 10^6 \text{ км}^2$, что составляет 71% жизнепригодной территории суши. Для восстановления естественных сообществ биосферы по состоянию на 2007 г. необходимо сократить площадь нарушенных человеком земель с 71 до 38% (цифра К.Я. Кондратьева), то есть на 33% или на $23,2 \cdot 10^6 \text{ км}^2$.

Восстановление продукционного потенциала биосферы

Оно возможно за счет площадей, использующихся в сельскохозяйственном производстве и (или) урбанизированных территорий. Рассмотрим эти варианты.

1. Восстановление потенциала биосферы за счет сокращения площадей сельскохозяйственного назначения.

Оценим вначале численность населения, которую способна обеспечить продовольствием современная площадь сельхозугодий. При численности населения Земли в 2007 г., равной 6,5 млрд, удельная сельскохозяйственная площадь, эквивалентная $31 \cdot 10^6 \text{ км}^2$, составляет 0,48 га/чел. «Расчеты показывают, что для обеспечения продуктами питания каждого жителя нашей планеты надо 0,4–0,5 га земли при современных, близких к предельным, уровням урожайности» [3, с. 24]. Таким образом, современные площади сельхозугодий способны обеспечить продовольствием 6,5 млрд человек.

При изъятии $23,2 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ из современной площади сельхозугодий для производства мировой сельхозпродукции останется $7,8 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. При численности населения 6,5 млрд удельная площадь, предназначенная для производства продовольствия, составит 0,12 га/чел. Это в четыре раза меньше нормы. Таким образом, восстановление продукционного потенциала биосферы за счет сокращения площади сельхозугодий приведет к сокращению численности населения планеты в 4 раза, до 1,63 млрд человек. Подчеркнем, что такая численность согласуется с однопроцентным порогом потребления первичной продукции биосферы, обеспечивающим ее стабильность (см. раздел 2.2 этой статьи) и начальными условиями для переменной P в моделях «Мир-2» и «Мир-2МС» на 1900 г.

2. Восстановление потенциала биосферы за счет сокращения площади урбанизированных территорий.

Площадь урбанизированных территорий составляет 38% площади нарушенных цивилизацией земель, и для частичного восстановления потенциала биосферы должна быть изъята у цивилизации полностью. При таком сценарии 6,5 млрд особей вида *Homo sapiens* должны будут вернуться к первобытному образу жизни в лесах и пещерах.

3. Восстановление потенциала биосферы за счет частичного сокращения площадей сельскохозяйственного назначения.

Рассмотрим сценарий, в котором урбанизированные площади земли ($19 \cdot 10^6 \text{ км}^2$) не изымаются. Сокращаются до $19 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ современные площади сельхозугодий ($31 \cdot 10^6 \text{ км}^2$). Таким образом, восстановлению подлежит площадь, равная $12 \cdot 10^6 \text{ км}^2$. Соответствующая ей удельная площадь, предназначенная для производства продовольствия, составляет 0,18 га/чел. Это в 2,5 раза ниже нормы, обеспечивающей полноценное питание человека. При нормальном питании численность населения планеты уменьшится с 6,5 млрд до 2,5 млрд.

Вывод: идея восстановления продукционного потенциала биосферы за счет сокращения площадей земель, нарушенных цивилизацией, сегодня не может быть осуществлена без одновременного сокращения экологической доминанты биосферы – численности населения планеты.

3.2. Локально-стационарные точки циклического движения численности населения

Выход из череды повторяющихся цивилизационных кризисов, предсказываемых моделью «Мир-2 MathCad», будем искать, исходя из доминирующей роли человечества в развитии биосферы. Уравнение демографического сектора в модели «Мир-2» записывается в виде

$$\frac{dP}{dt} = B - D, \quad (12)$$

где: B, D – скорости рождаемости и смертности населения P , имеющие размерность чел/г [32].

Функции B и D определяются выражениями

$$B = P \cdot C_B \cdot B_C \cdot B_F \cdot B_P \cdot B_Z, \quad (13)$$

$$D = P \cdot C_D \cdot D_C \cdot D_F \cdot D_P \cdot D_Z. \quad (14)$$

Здесь $C_B = 0,04$ (1/год), $C_D = 0,028$ (1/год) – коэффициенты рождаемости и смертности населения в «эталонном» 1970 г.; $B_C = B_C(C)$ и $D_C = D_C(C)$, $B_F = B_F(F)$ и $D_F = D_F(F)$, $B_P = B_P(P)$ и $D_P = D_P(P)$; $B_Z = B_Z(Z)$ и $D_Z = D_Z(Z)$ – графически (таблично) заданные функции, отражающие зависимость скорости рождаемости и смертности от: материального уровня жизни C , уровня питания F , плотности населения P , загрязнения природной среды Z . В «нормальных» условиях жизни 1970 г. эти функции не изменяют скоростей рождаемости и смертности и равны единице. При улучшении или ухудшении условий жизни значение соответствующей функции становится большим или меньшим единицы. Аргументы функции влияния, в свою очередь, зависят от текущих значений компонентов модели.

С учетом сказанного выражения (13), (14) запишем в общем виде

$$B = b(R, R, X, Z)P, \quad (15)$$

$$D = d(R, K, X, Z)P, \quad (16)$$

где: b, d – коэффициенты рождаемости и смертности.

Но:

$$B - D = E, \quad (17)$$

где: E – скорость прироста численности населения.

Очевидно, что

$$E = \varepsilon(R, K, X, Z)P, \quad (18)$$

где: ε – коэффициент прироста численности населения.

С учетом выражений (17), (18) уравнение (12) представим в виде

$$\frac{dP}{dt} = \varepsilon(R, K, X, Z)P, \quad (19)$$

или

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \varepsilon(R, K, X, Z). \quad (20)$$

Напомним, что в результате решения системы уравнений модели «Мир-2МС» все ее переменные определялись как функции времени. Левая часть уравнения (20) $1/P (dp/dt)$, тождественно равная $\varepsilon(R, K, X, Z)$, позволяет изобразить фазовую траекторию, используя параметрическую форму $[\varepsilon(t), P(t)]$, где в качестве параметра выступает время. Эту же траекторию можно получить как множество точек на плоскости $\{1/P(t) [dP(t)/dt], P(t)\}$. На рис. 11 представлена фазовая траектория для модельного сценария (300%) с начальным запасом топливных ресурсов $R_0 = 27 \cdot 10^{11}$ единиц ресурсов.

Спиралевидная фазовая траектория, изображенная на рис. 11, в популяционной экологии называется «кривой типа Олли». Она присуща популяциям с ярко выраженным групповым поведением и взаимопомощью, например, популяциям птиц и животных, у которых существуют групповые формы защиты от нападения хищников, совместного выращивания потомства и т. п. [25]. Выясняется, что присуща она и для человечества.

Сплайновая аппроксимация зависимости типа Олли позволяет решить уравнение (19) численным методом. Это решение, с точностью до аппроксимации, совпадает с поведением переменной $P(t)$ в модели «Мир-2МС».

Стационарное движение глобальной модели – это то предельное движение, к которому она стремится. Частным случаем стационарного движения является невыраженное состояние равновесия, в котором скорости, определяемые из дифференциальных уравнений, описывающих поведение глобальной модели, обращаются в ноль. Говорить о глобальном стационарном состоянии модели можно только в том случае, если существует точка в фазовом пространстве компонент, в которой все правые части уравнений модели равны нулю при $t \rightarrow \infty$.

Будем обозначать локально-стационарные точки индексом ^(с). Тогда локально-стационарные точки $P^{(с)}$ уравнения (19) определяются из условия $dP/dt = 0$. В случае зависимости типа Олли возможно существование нескольких локально-стационарных точек. В сценарии $R_0 = 27 \cdot 10^{11}$ (300%) таких точек 6 (рис. 11). Устойчивость или неустойчивость этих точек определяется по знаку производной $\frac{d}{dP}[\varepsilon(P)P]$ в стационарной точке $P^{(с)}$ [25].

Раскроем эту производную:

$$\varepsilon(P)P] = P \frac{d\varepsilon(P)}{dP} + \varepsilon(P) \frac{dP}{dP} = P \frac{d\varepsilon(P)}{dP} + \varepsilon(P). \quad (21)$$

В соответствии с уравнением (20) запишем:

$$\frac{d}{dP}[\varepsilon(P)P] = P \frac{d\varepsilon(P)}{dP} + \frac{1}{P} \frac{dP}{dt}. \quad (22)$$

Но в стационарной точке, по определению, $dP/dt = 0$. Поэтому вместо выражения (22) запишем:

$$\frac{d}{dP}[\varepsilon(P)P] = P \frac{d\varepsilon(P)}{dP}. \quad (23)$$

Локально-стационарная точка называется устойчивой, если в ней $d\varepsilon(P)/dP < 0$, и неустойчивой, если $d\varepsilon(P)/dP \geq 0$. Знак производной определяется по знаку тангенса угла между положительным направлением оси P и касательной к функции $\varepsilon(P)$ в стационарной точке.

Видно (рис. 12), что в сценарии с начальным условием $R_0 = 27 \cdot 10^{11}$ единиц ресурсов присутствуют 2 устойчивые $P^{(сy)}$ и 3 неустойчивые $P^{(сн)}$ локально-стационарные точки, а также устойчивое по Ляпунову движение, асимптотически приближающееся к предельной плотности насыщения популяции P^* . В рассматриваемом сценарии $P^* = 1,3$ млрд человек.

Каково бы ни было ненулевое значение численности населения P , популяция стремится к локально-устойчивым стационарным состояниям. Если $P \in (P_0, P_1^{(сн)})$, то популяция стремится к стационарному состоянию $P_1^{(сy)}$, если $P \in (P_1^{(сн)}, P_2^{(сн)})$, то к $P_1^{(сy)}$, если $P \in (P_3^{(сн)}, \infty)$, то к P^* (рис. 12). Очевидно, что оптимальным значением P_0 в сценарии, моделирующем ускоренный переход от циклического развития цивилизации к стационарному движению, является локально-стационарное состояние $P_1^{(сy)}$.

3.3. Ускоренный переход от циклического к стационарному движению цивилизации

На 1 января 2016 г., несмотря на ограничение рождаемости экономическими методами (одна семья – один ребенок), население Китайской Народной Республики достигло 1,378 млрд человек, а его годовой прирост – 7,28 млн¹⁰. Это больше, чем стационарное движение

¹⁰ countrymeters.info/ru/China



Рис. 11. Кривая типа Олли для численности населения в модели «Мир-2МС». Первоначальные запасы топливных ресурсов $R = 27 \cdot 10^{11}$ PE; сценарий (300%)

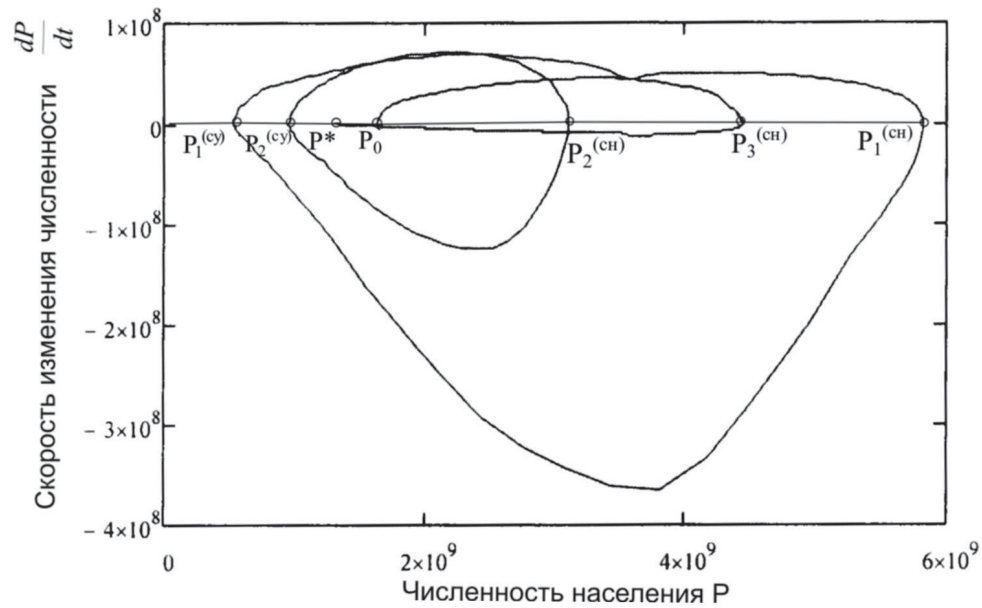


Рис. 12. Фазовая диаграмма модели $dP/dt = \varepsilon(R, K, X, Z)P$. Первоначальные запасы традиционных топливных ресурсов $R_0 = 27 \cdot 10^{11}$; сценарий (300%). Принятые обозначения: P_0 – тривиальное устойчивое состояние; $P_1^{(cy)}, P_2^{(cy)}$ – локально-устойчивые стационарные состояния; $P_1^{(ch)}, P_2^{(ch)}, P_3^{(ch)}$ – локально-неустойчивые стационарные состояния; P^* – предельная плотность насыщения популяции

в модели «Мир-2МС». Население Республики Индия на эту же дату составило 1,252 млрд¹¹. В 1994 г. в Каире состоялась Конференция ООН по народонаселению и развитию¹². Она показала, что групповые, национальные и конфессиональные интересы преобладают над общечеловеческими. Численность населения планеты с тех пор увеличилась на 1,622 млрд и на 1 января 2016 г. достигла 7,296 млрд¹³. Мировые экономические кризисы и многочисленные локальные войны в условиях однополярного мира отвлекают огромные финансовые ресурсы от решения глобальных проблем человечества. В таких условиях только «социальные оптимисты» могут полагать, что все уладится само собой. Время, необходимое для реформирования мировой системы, упущено. Первой осцилляции численности населения и социально-экономических показателей, по-видимому, не избежать.

Вторая и последующие осцилляции численности могут быть предотвращены, если после демографического кризиса во второй половине XXI в. численность населения планеты будет зарегулирована в соответствии с логистической моделью

$$\frac{dP}{dt} = (\alpha - \gamma P)P. \quad (24)$$

Здесь $\varepsilon = \alpha - \gamma P$ есть коэффициент прироста численности населения P ; $\alpha, \gamma > 0$ суть параметры линейной зависимости коэффициента прироста от численности населения.

Население возрастает не беспредельно. Его численность ограничена сверху:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = \alpha/\gamma = P_{\max}, \quad (25)$$

где P_{\max} – предел насыщения численности популяции, к которому асимптотически стремится P .

Перепишем уравнение (24) в виде

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\alpha}{\gamma} - P \right) P, \quad (26)$$

или в соответствии с (25) в виде

$$\frac{dP}{dt} = \frac{1}{\gamma} (P_{\max} - P)P. \quad (27)$$

Здесь γ – свободный параметр. Выразим его через другие постоянные, имеющие смысловую нагрузку: P_0, ε_0 – численность населения и коэффициент ее прироста в начальный момент времени t_0 . Очевидно, что $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(P_0)$. Положим:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{\varepsilon_0}{P_{\max} - P_0}. \quad (28)$$

Подставив выражение (28) в уравнение (27), получим

$$\frac{dP}{dt} = \varepsilon_0 \frac{(P_{\max} - P)}{(P_{\max} - P_0)} P. \quad (29)$$

Это эквивалентная форма записи логистической модели (24). Очевидно, что линейная зависимость коэффициента прироста от численности населения определяется выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{(P_{\max} - P)}{(P_{\max} - P_0)}. \quad (30)$$

Ускоренный переход от циклического к стационарному движению цивилизации рассмотрим на примере сценария с традиционными запасами топливных ресурсов $R_0 = 27 \cdot 10^{11}$ РЕ (300%). В этом, наиболее вероятном, сценарии первое локально-устойчивое стационарное состояние приходится на 2075 г. при численности населения $P_1^{(cy)} = 0,54$ млрд (рис. 12). Примем эту численность в качестве начального условия $P_0 = 0,54$ в логистической модели. Коэффициент прироста численности населения ε_0 в 2075 г. примем равным 0,02. Предел насыщения численности популяции P_{\max} примем численно равным стационарному, по Ляпунову, движению населения: $P_{\max} = P^* = 1,5$ млрд человек.

Рис. 13 иллюстрирует процесс ускоренного перехода Мировой системы к стационарному, по Ляпунову, движению. Видно, что при $\varepsilon = 0,02$ численность населения выходит на стационарный режим приблизительно через 160 лет, то есть к 2240 г. Варьируя параметр ε_0 , можно ускорить или замедлить выход численности на стационарный режим.

Для объяснения временной изменчивости компонент Мировой системы в рассматриваемом сценарии воспользуемся историческими примерами и потоковыми диаграммами (петлями обратной связи) модели «Мир-2» [32].

После завершения первого демографического кризиса численность населения упадет до 0,54 млрд. Обратимся к истории. Такая численность была в середине XVII в. [23]. Тогда человечество в качестве двигателей в мануфактурах использовало водяные колеса и ветряные мельницы. Численность населения 1,5 млрд была в конце XIX в. Тогда основным двигателем на заводах была паровая машина, а топливом – дрова. Человечество в это время существовало за счет возобновляемых топливных ресурсов. Теперь посмотрим в будущее. Достигнутая после роста по логистическому закону численность населения 1,5 млрд человек в последующие столетия не изменится. Население будет находиться в стационарном движении, главным образом, за счет возобновляемых природных ресурсов. Невозобновляемые топливные ресурсы после 2075 г. практически не потребуются, и их стационарное движение будет происходить на уровне $19 \cdot 10^{11}$ РЕ.

¹¹ countrymeters.info/ru/India

¹² www.r-komitet.ru/s_i_d/kair1.htm

¹³ https://ru.wikipedia.org/wiki/население_Земли

Капитал экономики (основные фонды промышленности, предприятий сервисного обслуживания и сельского хозяйства), согласно потоковой диаграмме, зависит от инвестиций и времени «жизни» (скорости износа) основных фондов. Инвестиции, в свою очередь, являются функцией численности населения (количества инвесторов) и материального уровня жиз-

ни населения, зависящего, в свою очередь, от текущих запасов топливных ресурсов. Основные фонды экономики ($1,3 \cdot 10^{10}$ единиц капитала, ЕК), сформировавшиеся в фазе подъема цивилизации (1900–2022 гг.) за счет инвесторов (5,81 млрд человек) с достаточно высоким материальным уровнем жизни, имеют значительный временной лаг (время «жизни» фондов, рав-

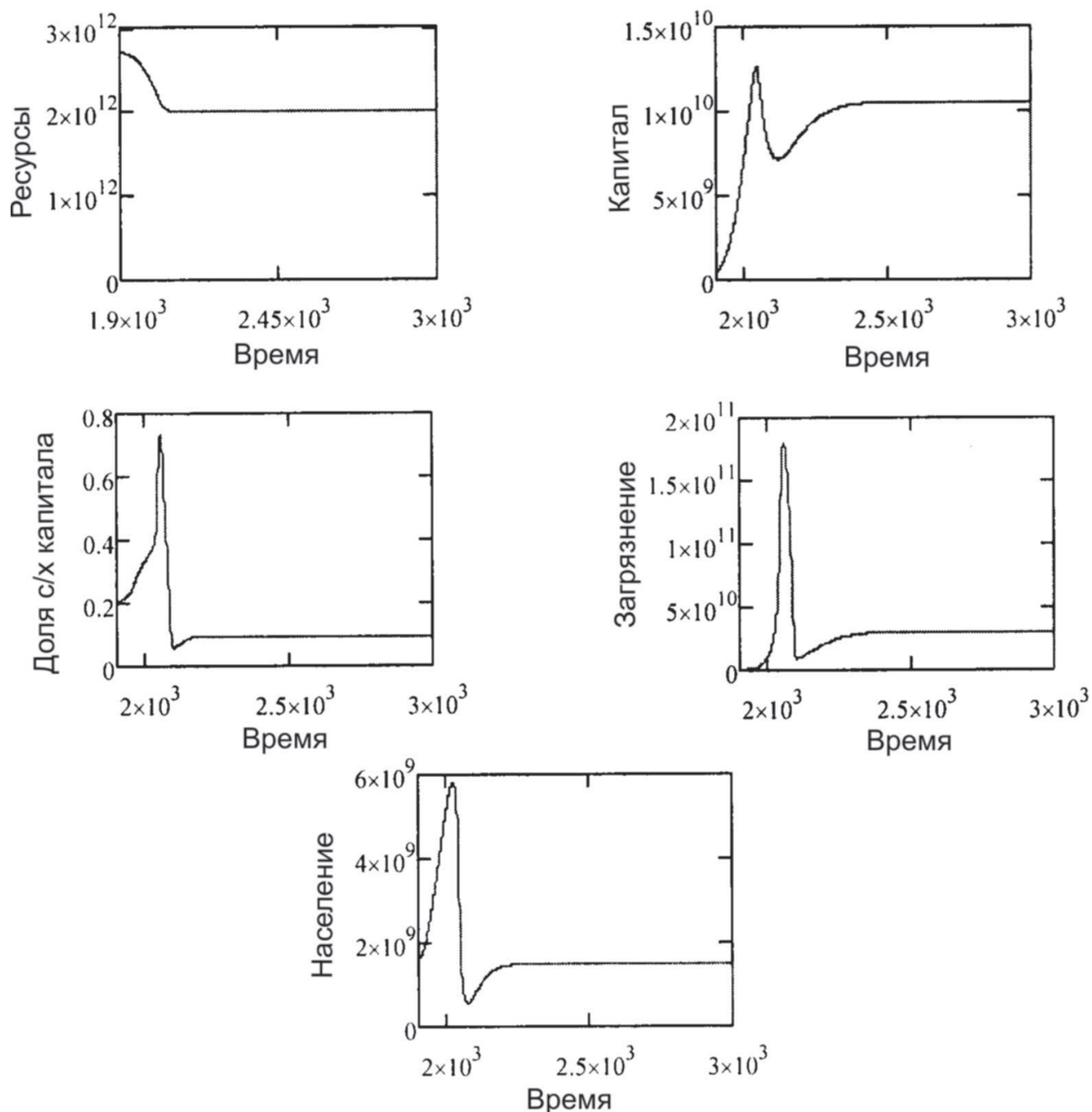


Рис. 13. Временная изменчивость компонент глобальной системы в модели «Мир-2МС». Первоначальные запасы традиционных топливных ресурсов $R_0 = 27 \cdot 10^{11}$ РЕ; сценарий (300%). С 2075 г. численность населения изменяется по логистической модели с параметрами $\alpha = 0,02$ и $P^* = 1,5$ млрд человек

ное 40 годам). В фазе падения численности населения (2022–2075 гг.) этот лаг удерживает основные фонды на уровне $7,5 \cdot 10^9$ ЕК. В фазе логистического роста численности населения (инвесторов) основные фонды увеличиваются до 10^{10} ЕК и выходят, вслед за населением, на уровень стационарного движения.

Доля сельскохозяйственных фондов в общих фондах экономически определяется, главным образом, уровнем питания населения и временем «жизни» сельскохозяйственных фондов. В фазе подъема численности населения доля сельскохозяйственных фондов постоянно возрастает и достигает 0,75 от общих фондов экономики. Небольшой временной лаг фондов сельского хозяйства (15 лет) не спасает их от деградации в фазе падения численности населения. К 2075 г. их доля опускается до 0,06. В фазе логистического роста численности населения доля сельскохозяйственных фондов возрастает до 0,09 и выходит на уровень стационарного движения.

Уровень загрязнения природной среды зависит от скорости генерации загрязнителей и их деструкции. Скорость генерации является функцией численности населения и величины капитала на душу населения. Скорость деструкции зависит от величины загрязнения и скорости самоочищения среды обитания. В фазе подъема численности населения и капитала загрязнение увеличивается до уровня $1,7 \cdot 10^{11}$ единиц загрязнения. В фазе падения этих компонент загрязнение уменьшается за счет сокращения его генерации и увеличения деструкции. В фазе логистического роста численности населения и капитала экономики загрязнение вновь увеличивается до $2,5 \cdot 10^{11}$ единиц загрязнения и выходит на уровень стационарного движения.

Может сложиться впечатление, что стационарное движение цивилизации возвращает ее в XIX в. Это не так. Для того, чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить начальные условия компонент и уровни их стационарного движения. Видно, что капитал экономики существенно вырос, что привело к повышению материальной составляющей качества жизни населения. Пищевая составляющая качества жизни также увеличилась. Действительно, сельскохозяйственный капитал, определяемый как капитал экономики, умноженный на долю сельскохозяйственного капитала, в 1900 г. составлял $0,08 \cdot 10^9$ единиц капитала, а в 2500 г. – $0,9 \cdot 10^9$ единиц.

4. ГИПОТЕЗА О СВЯЗИ ЦИКЛОВ РАЗВИТИЯ ЦИВИЛИЗАЦИИ С ФАЗАМИ ГЛОБАЛЬНОГО ГИПЕРЭТНОСА

«Безболезненный» ускоренный переход населения планеты к стационарному движению возможен, по видимому, только после формирования глобальной

гиперэтнической системы на основе общей ментальности населения – особенностей психического склада и мировоззрения людей. Рассмотрим этот тезис подробнее.

Становление глобального гиперэтнуса происходит уже сегодня в процессе глобализации. Наступившая в конце XX – начале XXI в. постиндустриальная эпоха характеризуется бурным развитием транснациональных корпораций и общего рынка, интернационализирующих экономическую жизнь планеты. Усилилась деградация природных ландшафтов, являющихся вместилищем этносов. В постиндустриальную эпоху происходит невиданное ранее развитие информационных технологий. Всемирная паутина Интернета, телекоммуникационные сети, спутниковое телевидение формируют единое мировое информационное поле. Массовая культура заменяет классическую и народную. Происходит межгосударственная стандартизация образования и унификация международного языкового общения на англоязычной основе. Быстро развиваются международные транспортные коммуникации. На планете сформировался пояс голода. Он простирается вдоль экватора и тропиков через Африку, Ближний и Средний Восток, Юго-Восточную Азию и Латинскую Америку, где голодают 28–30% населения [14]. Следствием неравномерного социально-экономического развития государств являются плановые и неуправляемые трудовые миграции населения, ведущие к смешению этнических общностей. Все эти процессы повышают вероятность формирования единой ментальности человечества и на ее основе глобальной гиперэнергетической системы, способной регулировать рождаемость населения при переходе к логистической модели роста его численности.

В статье [30] рассматриваются фазы этногенеза Североамериканского, Западноевропейского, Китайского, Мусульманского и Евразийского суперэтнуса. Сделан вывод, что наиболее вероятным ядром формирования Мирового гиперэтнуса является Североамериканский суперэтнос, как наиболее молодой, находящийся в «фазе подъема» и наиболее пассионарный.

В дальнейшем изложении будем исходить из гипотезы, что становление глобального гиперэтнуса происходит уже сегодня в процессе глобализации, а ядром его формирования является суперпозиция Североамериканского и Западноевропейского суперэтнуса, обладающих высоким пассионарным напряжением и сходной ментальностью. На сегодняшний день это наиболее вероятный сценарий. Из трех реализованных на модели «Мир-2МС» сценариев развития глобальной социально-экологической системы остановимся на сценарии с увеличенными на 300% по сравнению с моделью «Мир-2» запасами невозобновляемых природных ресурсов. С учетом возрастающего во времени потребления ресурсов и увеличения

стоимости их добычи этот сценарий представляется наиболее вероятным. Трехкратному увеличению запасов соответствуют начальное условие $R_0 = 2700 \cdot 10^9$ (предполагается, что начиная с 1900 г. ресурсов хватило бы на 750 лет при скорости их потребления, существовавшей в 1970 г.). Начальные условия для остальных компонентов моделей в этом сценарии приняты такими же, как в базовом варианте модели «Мир-2»: для населения $P_0 = 1,65 \cdot 10^9$ человек; для капитала мировой экономики $K_0 = 0,4 \cdot 10^9$ единиц капитала (предполагается, что в 1900 г. на человека приходилось вчетверо меньше капитала, чем в 1970 г.); для доли сельскохозяйственного капитала в общем капитале экономики $X_0 = 0,2$; для загрязнения природной среды $Z_0 = 0,2 \cdot 10^9$ единиц загрязнения капитала (считается, что в 1900 г. на душу населения приходилось в 8 раз меньше загрязнений, чем в 1970 г.). Результаты моделирования развития глобальной социально-экологической системы иллюстрирует рис. 14.

По оси абсцисс на рис. 14 отложены годы с 1900 до 2800 и указаны наименования фаз этногенеза. Оцифровка оси ординат единая для всех компонент системы. В легенде указаны названия и графические идентификаторы компонент и делители, на которые необходимо разделить снятые с графиков значения компонент для того, чтобы определить их фактические величины.

Анализ результатов моделирования показывает, что осцилляция компонент социально-экологической системы качественно коррелирует с фазами этногенеза, обнаруженными Л.Н. Гумилевым при изучении исторических материалов. Это обстоятельство дает возможность совместного рассмотрения этнической и социально-экологической составляющих развития цивилизаций.

Фаза подъема гиперэтнуса

В этой фазе выделяются два этапа: скрытый и явный подъем. Началом этапа скрытого подъема будем считать первую половину VIII в. – время усиливающегося переселения пассионариев из Европы в Северную Америку, начала индустриальной эры цивилизаций (домонополитический капитализм), начала демографического взрыва на планете (в 1650 г. численность населения планеты оценивается в 550 млн человек [23]). Продолжительность первого этапа Л.Н. Гумилев оценивает в 150–200 лет. Таким образом, явный этап фазы подъема наступил в начале XX в.

В явном этапе фазы подъема происходит интенсивный рост пассионарного напряжения в этнической системе. Пассионарные индукторы сплавивают в своем поле массу гармоничных личностей. Для этой фазы характерен рост всех видов активности гиперэтнуса: демографический взрыв, экономический рост, экологические неурядицы, внутренние конфликты, быст-

рый рост числа этнических подсистем, высокая дисциплина этнического коллектива.

Экспоненциальный рост численности населения влечет за собой рост численности пассионариев по такому же закону. Из-за повышенной фертильности пассионариев их численность может увеличиваться даже быстрее, чем это происходит у гармоничных личностей.

Свидетельством роста пассионарного напряжения в глобальном гиперэтнуса является также распад колониальной системы, произошедший после Первой и Второй мировых войн. Бывшие колонии превратились в независимые государства, увеличив, тем самым, сложность глобальной гиперсистемы. Международным органом управления этой системой стала Организация Объединенных Наций.

Увеличение активности экономических агентов гиперэтнуса на явном этапе стадии подъема выразилось в переходе от домонополитического капитализма к монополистическому, формированию транснациональных компаний, бурному росту валового внутреннего продукта (ВВП) и валового национального продукта (ВНП), слагающих систему государств. Движущей силой роста рыночной экономики являются предприниматели – люди энергоизбыточного типа, стремящиеся к достижению максимальной прибыли при минимальных издержках производства.

По данным модели «Мир-2МС» основные фонды мировой экономики возросли от $0,4 \cdot 10^9$ единиц капитала в 1900 г. до $0,65 \cdot 10^{10}$ единиц в 1990 г., то есть в 15,6 раза. Растущая численность населения потребовала увеличения доли сельскохозяйственного капитала от 0,2 в 1900 г. до 0,32 в 1990 г. Постепенно растет загрязнение природной среды. Запасы невозобновляемых природных ресурсов за 90-летний интервал времени снизились с $27 \cdot 10^{11}$ до $24,1 \cdot 10^{11}$ РЕ. Таким образом, за явный этап фазы подъема гиперэтнуса использовано только 10,8% первоначальных запасов ресурсов.

Акматическая фаза гиперэтнуса

Фаза акматическая – это колебание пассионарного напряжения в этнической системе после фазы подъема на предельном для данной системы уровне пассионарности. Время окончания фазы подъема и начала акматической фазы можно определить по изменению типа связи между коэффициентом прироста численности населения и самой численностью – по смене положительной корреляционной связи на отрицательную. Формально, это точка перегиба кривой роста численности населения, в которой $(d^2P(t)) / (dt^2) = 0$. В дискретном представлении, при шаге по времени, равном 1 году, точка перегиба кривой определяется выражением: $P_{i+1} - 2P_i + P_{i-1} = 0$. Расчеты, выполненные на модели «Мир-2МС», показали, что начало акматической фазы приходится на 1990 г. По данным демографиче-

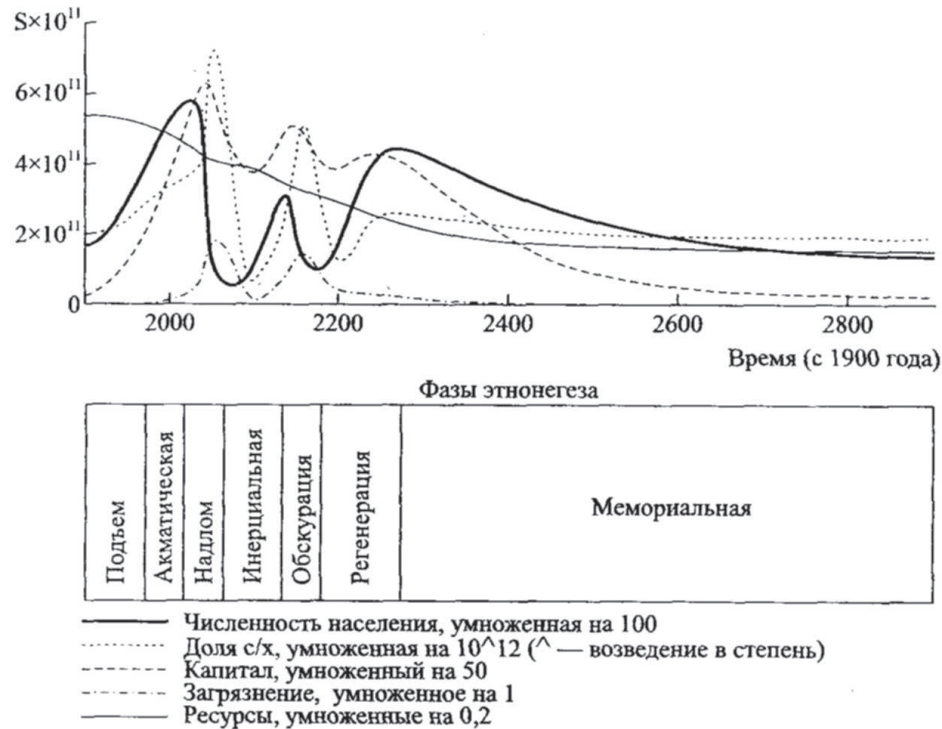


Рис. 14. Временная изменчивость компонент глобальной социально-экологической системы и фазы этногенеза глобального гиперэтнуса. Пояснения к рисунку см. в тексте статьи

ской статистики в 1987 г. численность населения планеты составляла 5 млрд человек, в 2000 г. – 6 млрд в 2012 г. – 7 млрд. Таким образом, прирост численности стабилизировался, что согласуется с результатами моделирования.

В акматической фазе у пассионариев появляется стремление к максимальному утверждению себя как личности, даже вопреки интересам родного этноса. В новейшей истории примером такого самоутверждения является сговор политических лидеров РСФСР, Украинской ССР и Белорусской ССР в Беловежской пуще, оформивших, вопреки результатам всенародного референдума, выход своих республик из состава СССР и, как следствие этого, образование 15 государств на территории бывшего СССР.

Рост индивидуализма, сопровождающийся усилением пассионарного напряжения в системе, приводит гиперэтнос в состояние «пассионарного перегрева». В этом состоянии избыточная пассионарность расходует на межэтнические конфликты. Примеры: «парады суверенитетов» в бывших автономных республиках РСФСР: Чечне, Ингушетии, Северной Осетии, Татарстане; Карабахский конфликт; конфликты между Грузией, Абхазией и Южной Осетией; межэтнические войны на территории Социалистической Федеративной Республики Югославии. В акматической фазе число этнических подсистем и значимых событий в этнической

истории достигает максимума. Фаза еще не завершилась, и за оставшееся время многое может произойти.

По данным моделирования, численность населения в акматической фазе увеличивается с 4,82 млрд в 1990 г. до 5,81 млрд в 2022 г. Но скорость роста численности постепенно уменьшается до нуля. Основные фонды мировой экономики продолжают устойчиво расти с $0,65 \cdot 10^{10}$ ЕК в 1990 г. до $1,1 \cdot 10^{10}$ единиц в 2022 г., то есть в 1,7 раза. Продолжающийся рост численности населения требует дальнейшего расширения сельскохозяйственного производства. Доля сельскохозяйственного капитала за годы фазы обскурации возросла с 0,32 до 0,37. Загрязнение природной среды продолжает увеличиваться. Запасы невозобновляемых природных ресурсов за 32-летний интервал времени снизились с $24,1 \cdot 10^{11}$ до $21,9 \cdot 10^{11}$ РЕ.

Фаза надлома гиперэтнуса

По Л.Н. Гумилеву в фазе надлома происходит резкое снижение численности населения. Пропорционально этому снижается и численность пассионариев. Пассионарное напряжение в этнической системе резко падает. Это сопровождается расколом этнического поля, острыми конфликтами в этнической системе, ростом числа субпассионариев. Субпассионарность проявляется в неспособности сдерживать инстинктивные вождения, асоциальном поведении,

паразитизме, недостаточной заботе о потомстве. Суб-пассионарии обычно скапливаются в городах. Такое сосредоточение приводит к громадному росту алкоголизма, наркомании, преступности.

По данным моделирования время окончания акматической фазы и начала фазы надлома определяется по дате наступления первого максимума численности населения. Это должно произойти в 2022 г. В последующие 55 лет численность населения снизится с 5,81 млрд до 0,54 млрд за счет экстремально большой смертности и низкой рождаемости. Это глубочайший демографический кризис.

С целью улучшения качества жизни населения и предотвращения демографического кризиса основные фонды экономики в фазе надлома возрастут от $1,1 \cdot 10^{10}$ единиц капитала в 2022 г. до $1,26 \cdot 10^{10}$ в 2040 г. Резко возрастает доля сельскохозяйственного капитала – с 0,37 в 2022 г. до 0,72 в 2050 г. Интенсификация экономического развития приведет к катастрофическому росту загрязнения природной среды. К 2054 г. она достигнет $1,8 \cdot 10^{11}$ единиц загрязнения. Это почти в 1000 раз больше, чем было в 1900 г.

Принятые экономические меры не остановят депопуляционный процесс. Дефицит трудовых ресурсов приведет к рецессивному, а затем и депрессивному развитию экономики. К концу фазы надлома мировой капитал снизится до $0,88 \cdot 10^{10}$ единиц капитала, то есть на 30% по отношению к своему максимуму. Доля сельскохозяйственного капитала снизится до 0,36, то есть в 2 раза по отношению к максимуму.

Инерциальная фаза

По Л.И. Гумилеву в инерциальной фазе численность населения вновь возрастает. В процессе генетического дрейфа растет и число пассионариев. Пассионарное напряжение в системе повышается. Для инерциальной фазы характерно укрепление государственной власти и социальных институтов. Происходит интенсивное накопление материальных и культурных ценностей, активное преобразование окружающего ландшафта. Господствующим типом личности становится законопослушный, работоспособный человек. Труд воспринимается людьми не как обуза, а как необходимое условие достаточной жизни. Этнос производит огромную работу, которая полезна для экономики и культуры.

К этой характеристике инерциальной фазы, данной Л.Н. Гумилевым на основании анализа прошлого, так и хочется добавить взгляд В.В. Оленьева и М.П. Федорова в будущее: «Задачу создания управляемого, жизнеспособного мироустройства можно решить лишь на основе управляемой, плановой социально-экономической системы типа “экологического социализма”» [21]. В теории этногенеза Л.Н. Гумилева одним из главных факторов, определяющих формирование

этносов, является рост производительных сил, вызывающий изменение производственных отношений, а следовательно, и организацию общества. Из закона соответствия производственных отношений уровни развития производительных сил, с одной стороны, и закона падения природно-ресурсного потенциала – с другой, следует, что «эколого-социально-экономическое развитие (социоэкологической системы) подчиняется динамической формуле [24]: (Природно-ресурсный потенциал) \leftrightarrow (Производительные силы) \leftrightarrow (Производственные отношения)».

При прекращении экономического роста (глубокой депрессии в фазе надлома) рыночная экономика становится ненужной. Капиталистический способ производства, основанный на достижении максимальной прибыли при минимальных затратах, чаще всего работает за счет разрушения биосферы и становится опасным для человечества.

По данным моделирования, время окончания фазы надлома и начала инерциальной фазы определяется по дате наступления первого минимума численности населения (2075 г.; 0,54 млрд человек). В последующие годы численность населения возрастает за счет снижения смертности и увеличения рождаемости. Основные фонды экономики после непродолжительного снижения (до $7,52 \cdot 10^9$ единиц капитала в 2097 г.) вновь возрастают. Доля основных фондов сельского хозяйства после существенного снижения (до 0,07 в 2095 г.) вновь повышается. Загрязнение природной среды снижается в 2097 г. до $1,22 \cdot 10^{10}$ единиц загрязнения, а затем начнет плавно повышаться.

Если гипотеза о связи фаз этногенеза с циклическим развитием цивилизации справедлива, то переход к логистической модели роста численности населения должен произойти без экономических, социальных и экологических потрясений. Негативный опыт фазы надлома и смена преобладающего типа личности от субпассионариев к гармоничным людям в инерциальной фазе будет способствовать регулированию рождаемости до уровня, обеспечивающего простое воспроизводство населения.

ВЫВОДЫ

Сценарии, реализованные на модели глобального развития «Мир-2МС», позволяют сделать следующие заключения, имеющие не прогностический характер, а указывающие лишь на тенденции развития цивилизации.

1. В XXI в. цивилизацию ожидает не катастрофа, как это предсказывают глобальные модели развития «Мир-2» и «Мир-3», а экстремально глубокие демографический, экономический и экологический кризисы, после которых последует восстановление. Менее глубокие и имеющие другой генезис региональные кризисы не раз встречались в истории человечества.

2. Потенциально, развитие цивилизации в третьем тысячелетии должно иметь циклический характер. Число циклов должно увеличиваться пропорционально энерговооруженности цивилизации. Каждый цикл оканчивается кризисом цивилизации. При ресурсно-энергетическом потенциале, ограниченном запасами традиционного ископаемого топлива (нефть + газ + уголь), ожидается 3–4 цикла развития; при расширении потенциала за счет сланцевой нефти – до 15 циклов, вслед за которыми цивилизация переходит к стационарному (по Ляпунову) движению компонент.

3. При широком использовании энергии управляемого термоядерного синтеза число циклов неограниченно возрастает, и Мировая система переходит в режим гармонического осциллятора, совершая колебания компонент относительно состояний равновесия.

4. Человечество является экологической доминантой биосферы в границах одного отдельно взятого цикла развития Мировой системы. Капитал, продовольствие и загрязнение природной среды, являющиеся продуктами социально-экономического метаболизма человечества и зависящие от текущих запасов энергетических ресурсов, лимитируют численность населения в пределах одного цикла развития, но не определяют число циклов.

5. В пяти модельных сценариях, отличающихся различными запасами топливных ресурсов, численность стационарного движения населения, к которому переходит система после заключительного цикла, изменяется в пределах 1,3–1,6 млрд человек. Численность населения, соответствующая однопроцентному порогу потребления первичной продукции, обеспечивающему устойчивость биосферы, составляет 1,7 млрд человек. Таковую же расчетную численность (1,63 млрд) способна поддерживать биосфера в сценарии с полной

рекультивацией современных сельскохозяйственных земель. Таким образом, порог насыщения численности популяции, к которому асимптотически стремится логистическая кривая численности населения, может быть принят в интервале 1,3–1,7 млрд человек.

6. Расчеты показали, что восстановление экологических систем на сельскохозяйственных угодьях и урбанизированных территориях, предлагаемое авторами биосферной концепции устойчивого развития в качестве временной альтернативы сокращению численности населения, невозможно без пропорционального и синхронного сокращения численности. Способ восстановления экосистем авторами концепции обсуждается, а способ сокращения численности населения – нет.

7. Циклическое движение населения планеты формально обусловлено спиралевидной формой зависимости коэффициента прироста от численности населения, известной в популяционной экологии под названием кривой типа Олли. Эта кривая объясняет существование нескольких устойчивых и неустойчивых локально-стационарных состояний циклического движения населения. Устойчивые состояния обеспечивают возможность ускоренного перехода к стационарному движению цивилизации.

8. Переход от циклического к стационарному движению должен осуществляться из устойчивого локально-стационарного состояния по логистической модели роста численности популяции с порогом насыщения численности, равным 1,5 млрд человек.

9. «Безболезненный» переход возможен, по-видимому, только после формирования глобальной гиперэтнической системы с общей ментальностью населения, то есть особенностями психического склада и мировоззрения людей, живущих в управляемой, плановой социально-экономической системе типа «экологического социализма».

Литература

Список русскоязычной литературы.

1. Акаев АА, Яковец ЮВ, Соколов НВ, Сарыгулов АН. Прогнозные расчеты динамики цивилизации на базе логистической модели. В кн.: Будущее цивилизации и стратегия цивилизационного партнерства. Яковец ЮВ, Кузыка БН, Бектурганов НС, редакторы. М.: МИСК; 2009. с. 496-527.
2. Араб-Оглы ЭА. Демографические и экологические прогнозы. М.: Статистика; 1978.
3. Белозерский ГН, Вуглинский ВС, Лавров СБ, Ласточкин АН, Морачевский ВГ, Петров КМ, Селиверстов ЮП, Сергеев ЮН, Смирнов ЛЕ, Фукс ВР. Основы геоэкологии. Учебник. СПб.: Изд-во СПбГУ; 1994.
4. Беляев ВС. Теория сложных геосистем. Киев: Наукова думка; 1978.
5. Бигон М, Харпер Дж, Таунсенд К. Экология особи, популяции и сообщества. Т. 1. Гиляров ЛМ, редактор. М.: Мир; 1989.

6. Введенский БА, редактор. Питание. В кн.: Большая советская энциклопедия. Т. 33. М.: БСЭ; 1955.
 7. Вернадский ВИ. Биосфера. Т. 5. М.: Наука; 1960.
 8. Горшков ВГ. Энергетика биосферы и устойчивость состояния окружающей среды. М.: ВИНТИ; 1990.
 9. Гумилев ЛН. Этносфера. История людей и история природы. М.: Экопрос; 1993.
 10. Дадаян ВС. Орбиты планетарной экономики. М.: Наука; 1989.
 11. Егоров ВА, Каллистратов ЮН, Митрофанов ВБ, Пионтковский АА. Математические модели глобального развития. Л.: Гидрометеоздат; 1980.
 12. Клейн ЛР. Проект ЛИНК. Экономика и математические методы. 1977;13 (3):471-92.
 13. Кондратьев КЯ. Глобальная экодинамика и ее тенденции. В кн.: Экодинамика и экологический мониторинг Санкт-Петербургского региона в контексте глобальных изменений. СПб.: Наука; 1996. с. 5-60.
 14. Лавров СБ, Сдасюк ГВ. Этот контрастный мир. М.: Мысль; 1985.
 15. Матросов ВМ, Матросова ИВ. Глобальное моделирование с учетом динамики биомассы и сценарии устойчивого развития. В кн.: Новая парадигма развития России. (Комплексные исследования проблем устойчивого развития). М.: Academia; 1999. с. 18-24.
 16. Матросова КВ. Устойчивое развитие в модифицированной математической модели «Мировая динамика». В кн.: Новая парадигма развития России. (Комплексные исследования проблем устойчивого развития). М.: Academia. МГУК; 1999. с. 344-53.
 17. Махов СА. Математическое моделирование мировой динамики и устойчивого развития на примере модели Форрестера. М.: ИПМ РАН; 2005.
 18. Мовчан ВН. Экология человека. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2004.
 19. Доклад Международной комиссии по окружающей среде и развитию (МКОСР). Наше общее будущее. М.: Прогресс; 1987.
 20. Одум Ю. Основы экологии. Перевод с английского. Наумов НП, редактор. М.: Мир; 1975.
 21. Оленьев ВВ, Федоров АП. Глобалистика на пороге XXI века. Вопр философии. 2003;(5):18-30.
 22. Осипов ГВ, Лисичкин ВА. Глобальные модели развития человечества. Учебное пособие. Садовничий ВА, редактор. М.: НормаИнфра; 2015.
 23. Рамад Ф. Основы прикладной экологии. Л.: Гидрометеоздат; 1989.
 24. Реймерс НФ. Природопользование. М.: Мысль; 1990.
 25. Свирижев ЮМ, Логофет ДО. Устойчивость биологических сообществ. М.: Наука; 1978.
 26. Сергеев ЮН. Моделирование экологических систем. В кн.: Основы геоэкологии. Учебник. Морачевский ВГ, редактор. СПб.: Изд-во СПбГУ; 1994.
 27. Сергеев ЮН. Прогнозные сценарии развития социально-экологической системы на территории бывшего СССР. Вестн СПбГУ сер 7. 1998; (4):17-26.
 28. Сергеев ЮН. Концепции и модели устойчивого развития цивилизации. Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбУ; 2007.
 29. Сергеев ЮН, Кулеш ВП. Концепция циклического развития цивилизации. Вестн СПбГУ сер 7. 2013;(2):57-70.
 30. Сергеев ЮН, Кулеш ВП. Глобальный этногенез и циклическое развитие цивилизации. Вестн СПбГУ сер 7. 2013;(4):80-97.
 31. Скиннер Б. Хватит ли человечеству земных ресурсов? М.: Мир; 1989.
 32. Форрестер Дж. Мировая динамика. М.: Наука; 1978.
- Общий список литературы/Reference List**
1. Akayev AA, Yakovets YuV, Sokolov NV, Sarygulov AN. [Forecasting calculations of civilization dynamics based on a logistic model]. In: Budushcheye Tsivilizatsii i Stratyegiya Tsivilizatsionnogo Partnerstva. Yakovets YuV, Kuzyka BN, Byekturganov NS, eds. Moscow: MISK; 2009. p. 496-527. (In Russ.)
 2. Arab-Ogly EA. Demograficheskiye i Ekologicheskiye Prognozy. [Demographic and Ecological Forecasts]. Moscow: Statistika; 1978. (In Russ.)
 3. Belozerskiy GN, Vuglinskiy VS, Lavrov SB, Lastochkin AN, Morachevskiy VG, Petrov KM, Seliverstov YuP, Sergeev YuN, Smirnov LYe, Fuks VR. Osnovy Gyeoekologii. Ucheybnik. Saint Petersburg: SPbU; 1994. (In Russ.)
 4. Beliaev VS. Teoriya Slozhnykh Geosistem. Kiev: Naukova Dumka; 1978. (In Russ.)
 5. Bigon M, Kharper D, Taunsend K. Ekologiya Osobi, Populyatsii i Soobshcheystva. Tom 1. Moscow: Mir; 1989. (In Russ.)
 6. Vvedenskiy BA, ed. [Nutrition]. In: Bol'shaya Sovetskaya Entsiklopyediya. Tom 33. Moscow: BSE; 1955. (In Russ.)
 7. Vernadsky VI. Biosfyera. Tom 5. Moscow: Nauka; 1960. (In Russ.)
 8. Gorshkov VG. Energetika Biosfery i Ustoychivost' Sostoyaniya Okruzhayushchey Sredy. Moscow: VINITI; 1990. (In Russ.)
 9. Gumilev LN. Etnosfyera. Istoriya Lyudey i Istoriya Prirody. Moscow: Ekopros; 1993. (In Russ.)

10. Dadayan VS. *Orbity Planetarnoy Ekonomiki*. Moscow: Nauka; 1989. (In Russ.)
11. Yegorov VA, Kallistratov YuN, Mitrofanov VB, Piontkovskiy AA. *Matematicheskiye Modeli Global'nogo Razvitiya*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1980. (In Russ.)
12. Klein LR. Project LINK. *Ekonomika i Matematicheskiye Metody*; 1977;13(3):471-92. (In Russ.)
13. Kondratyev KYa. [Global ecodynamics and its tendencies]. In: *Ekodinamika i Ekologicheskiy Monitoring Sankt-Peterburgskogo Regiona v Kontekste Globalnykh Izmeneniy*. Saint Petersburg: Nauka; 1996. p. 5-60. (In Russ.)
14. Lavrov SB, Sdasyuk GV. *Etot Kontrastnyy Mir*. Moskva: Mysl'; 1985. (In Russ.)
15. Matrosov VM, Matrosova IV. [Global simulation with account of dynamics of the Earth biomass and scenarios of sustainable development]. In: *Novaya Paradigma Razvitiya Rossii (Kompleksnyye Issledovaniya Problem Ustoychivogo Razvitiya)*. Moscow: Academia; 1999. p. 18-24. (In Russ.)
16. Matrosova KV. [Sustainable development in the modified model "The world Dynamics"]. In: *Novaya Paradigma Razvitiya Rossii (Kompleksnyye Issledovaniya Problem Ustoychivogo Razvitiya)*. Moscow: Academia; 1999. p. 344-53. (In Russ.)
17. Makhov SA. *Matematicheskoye Modelirovaniye Mirovoy Dinamiki i Ustoychivogo Razvitiya na Primere Modeli Forrestera*. Moscow: IPM RAN; 2005. (In Russ.)
18. Movchan VN. *Ekologiya Cheloveka Uchebnoye Posobiye*. Saint Petersburg: SPbGU; 2004. (In Russ.)
19. *Doklad Mezhdunarodnoy Komissii po Okruzhayushchey Srede i Razvitiyu (MKOSR)*. *Nashe Obshcheye Budushcheye*. Moscow: Progress; 1987. (In Russ.)
20. Odum Yu. *Osnovy Ekologii*. Moscow: Mir; 1975. (In Russ.)
21. Olenyev VV, Fedorov AP. [Globalistics on the eve of the 21st century]. *Voprosy Filosofii*. 2003;(5):18-30. (In Russ.)
22. Osipov GV, Lisichkin VA. *Globalnye Modeli Razvitiya Chelovechestva Uchebnoye Posobiye*. Moscow: NormaInfra; 2015. (In Russ.)
23. Ramad F. *Osnovy Prikladnoy Ekologii*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1989. (In Russ.)
24. Reymers NF. *Prirodopol'zovaniye*. Moscow: Mysl'; 1990. (In Russ.)
25. Svirezhev YuM, Logofet DO. *Ustoychivost' Biologicheskikh Soobshchestv*. Moscow: Nauka; 1978. (In Russ.)
26. Sergeyev YuN. [Simulation of ecological systems]. In: *Osnovy Geoekologii*. Uchebnyk. Morachevskiy VG, ed. Saint Petersburg: SPbGU; 1994. (In Russ.)
27. Sergeyev YuN. [Forecasting scenarios of the socioeconomic system of in former USSR territory]. *Vestnik SPbGU Ser 7*. 1998;(4):17-26. (In Russ.)
28. Sergeyev YuN. *Kontseptsii i Modeli Ustoychivogo Razvitiya Tsivilizatsii Uchebnoye Posobiye*. Saint Petersburg: SPbGU; 2007. (In Russ.)
29. Sergeyev YuN, Kulesh VP. [The concept of the cyclic development of civilization]. *Vestnik SPbGU Ser 7*. 2013;(2):57-70. (In Russ.)
30. Sergeyev YuN, Kulesh VP. [Global ethnogenesis and the cyclic development of civilization]. *Vestnik SPbGU Ser 7*. 2013;(4):80-97. (In Russ.)
31. Skinner B. *Khvatit li Chelovechestvu Zemnykh Resursov?* Moscow: Mir; 1989. (In Russ.)
32. Forrester Dzh. *Mirovaya Dinamika*. [World Dynamics]. Moscow: Nauka; 1978. (In Russ.)
33. Gallopin G, Gomez J. Food Sector. In: *Proc. Seminar on the Latin American World Model at IIASA*. Laxenburg, Austria; 1974.
34. Hardoy J, Mosorovich D. Urbanization and Housing. In: *Proc. Seminar on the Latin American World Model at IIASA*. Laxenburg, Austria; 1974.
35. Herrera A, Scolnik H, Homez J. World Model. In: *Proc. Seminar on the Latin American World Model at IIASA*. Laxenburg, Austria; 1974.
36. Kaya Y, Suzuki Y. *Global Constraints and New Vision for Development*. Japan Work Team of the Club of Rome. COR Tech. Sump. Tokyo; 1973.
37. Leontief W. *The Future of the World Economy*. UNO; 1976.
38. Malthus TR. *An Essay on the Principle of Population*. London: Johnson; 1798.
39. Meadows DL, Meadows DH. *Dynamics of Growth in a Finite World*. Cambridge: Mass. Wright Allen Press Inc.; 1974.
40. Mesarovic M, Pestel E. *Mankind at the Turning Point*. Second Report to the Club of Rome. N. Y.; 1974.
41. Motesharrei S, Rivas J, Kalnay E. Human and nature dynamics (HANDY): Modeling inequality and use of resources in the collapse or sustainability of societies. *Ecological Economics*. 2014;(101):90-102.
42. Scolnik H, Talavera L. The Functioning of the World and the Demographic Model. In: *Proc. Seminar on the Latin American World Model at IIASA*. Laxenburg, Austria; 1974.
43. Theimann H. Report on Battele's Activities to the Club of Rome. Tokyo, Battele, Geneva; 1973.
44. Verburg PH, Dearing JA, Dyke JG, Leeuw S, Seitzinger S, Steffen W, Syvitski J. Methods and approaches to modelling the Anthropocene. *Global Environmental Change*. 2016;(39):328-40.