

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

DOI: 10.36535/1994-8336-2020-06-1

ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ КЛИМАТ-ПРИРОДА-ОБЩЕСТВО

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

В.Ю. Солдатов
канд. физ.-мат. наук

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

И.И. Потапов

(Всероссийский институт научной и технической информации)

Предмет данной работы связан с проблемой устойчивого развития системы климат-природа-общество. Рассмотрено современное состояние этой проблемы и проанализированы перспективы развития глобальной энергетики. Современное общество потребления и его экологические ограничения рассматриваются как один из важных аспектов устойчивого развития. Основная идея состоит в том, что решение задач устойчивого развития системы климат-природа-общество от локальных до глобальных масштабов возможно с применением методов моделирования и привлечением данных мониторинга окружающей среды. Обсуждены различные глобальные модели и отмечены их особенности при параметрическом описании жизненного пространства. Предложены критерии качества этого пространства, основанные на показателях биологической сложности и живучести.

Ключевые слова: природа, климат, общество, энергия, критерий, устойчивость, живучесть.

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE CLIMATE-NATURE-SOCIETY SYSTEM

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

The subject of this study is connected with the problem of the climate-nature-society system sustainable development. Present state of this problem is considered and perspectives of global energetic development are analyzed. Present society of the consumption and its ecological restrictions are considered as one of important aspects of sustainable development. Basic idea consists in that solution of tasks of sustainable development of climate-nature-society system from local to global scales is possible with the use of modeling methods and the utilization of the environment monitor-

ing data. Different global models are discussed and their features are marked concerning with the description of living space. Criteria are proposed to be used for the assessment of the living space quality

Key word: climate, nature, society, sustainable development

Введение

Устойчивое развитие системы климат-природа-общество (СКПО) предполагает сохранение уровня удовлетворения потребностей человечества для будущих поколений на уровне не ниже современного уровня при сохранении непрерывного прогресса цивилизации. К сожалению, философские постулаты устойчивого развития постоянно вступают в противоречие с реальным состоянием дел. Многие исследователи предполагают, что 21-й век станет переломным рубежом между двумя вариантами развития человечества:

- модель неустойчивого стихийного развития цивилизации, когда экономика выступает как разрушительной силой;
- модель устойчивого развития, когда проблема исчерпаемости природных ресурсов будет рассматриваться с позиций обеспечения целостности и жизнеспособности биологических и физических природных систем.

На уровне многих национальных и международных стратегий природопользования наблюдается тенденция к поиску устойчивости в системе климат-природа-общество за счет разработки и внедрения ресурсосберегающих технологий, вторичной переработки отходов, освоения альтернативных источников энергии, более оптимального распределения ресурсов и благ. Однако проблема по-прежнему остается противоречивой. Эта противоречивость наблюдается в агропромышленных комплексах подавляющего количества стран, когда закономерности эволюции сельского хозяйства и развитие производительных сил находятся в противоречии между собой.

Пожалуй, впервые конструктивный взгляд на проблему устойчивого развития глобальной системы климат-природа-общество был сформулирован в работах [9,11,12,30]. По их определению устойчивое развитие современной цивилизации возможно только в рамках парадигмы ноосферы по Вернадскому при управляемом развитии общества, которое не разрушает своей природной основы и обеспечивает непрерывное развитие цивилизации. В последующих исследованиях развитие этого взгляда показало, что формирование стратегии устойчивого развития связано с определением условий долговременного выживания человечества [1,2,17]. Следуя этим исследованиям, рассмотрим отдельные аспекты устойчивого развития.

Глобальная энергетика: состояние и перспективы развития

Интенсивное развитие хозяйственной деятельности человека (определяемое, прежде всего, продолжающимся возрастанием численности населения на Земле) диктует необходимость дальнейшего развития энергетики. Основу производства энергии все еще составляет использование углеводородного сырья, что порождает серьезные экологические последствия. Не случайно в повестке дня состоявшегося 7-8 июля 2005 г. в Шотландии совещания группы восьми ведущих государств мира (группа G-8) в качестве одной из двух ключевых проблем была выбрана проблема глобального потепления. Следующая

32-я сессия Г-8 (2006 г., Россия) была сконцентрирована на обсуждении проблем энергетики и других важных проблем, включая:

- Альтернативные виды энергии и развитие водородной энергетической платформы.
- Безопасность в военном и финансовом обеспечении будущих поставок энергоресурсов.
- Экономические последствия глобальной нестабильности.

Важный социально-экономический аспект происшедших за последние годы изменений – неустойчивый уровень цен на нефть и природный газ. Проблемы энергоснабжения приобрели ключевое значение для дальнейшего развития цивилизации на планете. Остроту ситуации можно проиллюстрировать данными, относящимися к такому крупному развивающемуся государству как Бразилия. В 2001 г. в Бразилии случился серьезный кризис, который вынудил ввести ограничения на потребление энергии, чтобы избежать катастрофических «блэкаутов». Главными причинами кризиса были:

- 1) длительные засухи, продолжавшиеся (в различных регионах) на протяжении до 6 лет (1996-2001 гг.) и снизившие выработку гидроэлектроэнергии;
- 2) возраставшее энергопотребление;
- 3) задержки с пусками новых электростанций.

Специфика производства электроэнергии в Бразилии состоит в том, что в 2002 г. около 85 % приходилось на долю гидроэлектростанций, причем планирование гидроэлектрической системы предусматривало удовлетворение требований к уровню производства в случае последовательности трех засушливых лет. Однако в апреле 2001 г. объем воды в водохранилищах гидроэлектростанций составлял лишь 20-30 % по сравнению с максимальным значением. Именно это побудило правительство Бразилии принять решение о серьезном ограничении потребления электроэнергии.

Естественно, что сильная *экозависимость* производства электроэнергии диктует необходимость его диверсификации. В этой связи возникает необходимость комплексного анализа современного состояния и перспектив дальнейшего развития глобальной энергетики, имея в виду возможности его диверсификации, меры в области экономии энергопотребления, повышения уровня эффективности производства энергии и минимизацию негативных экологических последствий (переход от углеводородной к *чистой* энергетике). Речь идет о достижении в каждой отдельной стране и в мире в целом такого уровня производства энергии, который был бы экологически безопасным, устойчивым и обеспечивающим растущие потребности экономики (заметим, что, например, США затрачивают в настоящее время около полумиллиарда долларов ежедневно на импорт нефти, преимущественно из стран Ближнего Востока). При этом США снизили импорт нефти из стран ОПЕК (ОПЕК - Organization of the Petroleum Exporting Countries) до минимального значения за последние 30 лет и стали наращивать ее добычу внутри страны. Но неустойчивый ценовой уровень нефтепродуктов в эти стратегические решения вносит существенные поправки.

Важный аспект проблемы состоит в неспособности рыночных механизмов регулировать энергетику, с точки зрения ее устойчивости и экологической безопасности, что диктует необходимость вмешательства правительств и международных организаций. Обсуждение проблем энергетики обычно ограничивается анализом динамики потребительских цен на энергоносители и различных кризисных ситуаций, порожденных дефицитом энергоресурсов, также политическими спекуляциями. Ведь изменение цен на энерго-

ресурсы оказывает существенное влияние на состояние мировой экономики. Период высоких цен на энергоресурсы закончился во второй половине 2014 года, когда межтопливная конкуренция стала тесно коррелировать с политическими мерами и проблема устойчивого развития отступила на второй план.

Данные табл. 1 иллюстрируют темпы изменения глобального потребления ископаемых топлив. Обратимся далее к рассмотрению более детальных статистических данных, относящихся к различным видам ископаемых топлив и к энергоресурсам вообще, обратив сначала внимание на крайнюю неравномерность распределения энергопотребления по различным странам (табл. 2). Разумеется, обращает на себя внимание тот факт, что «средний» американец расходует в 10 раз больше энергоресурсов, чем «средний» китаец и в 20 раз больше по сравнению со «средним» индусом.

Таблица 1

**Глобальное потребление ископаемых топлив
(в млн. тонн нефтяного эквивалента) за 2000-2015 гг.**

Год	Уголь	Нефть	Газ	Год	Уголь	Нефть	Газ
2000	2337.6	3562.1	2175.5	2008	3500.1	3999.0	2751.0
2001	2348.7	3581.2	2216.9	2009	3451.9	3922.9	2679.1
2002	2411.0	3646.2	2276.7	2010	3611.2	4041.8	2879.7
2003	2610.0	3719.0	2343.1	2011	3777.4	4085.4	2943.8
2004	2914.5	3870.8	2435.6	2012	3798.8	4133.2	3017.8
2005	3122.4	3919.3	2505.3	2013	3867.0	4179.1	3052.8
2006	3278.0	3958.9	2577.9	2014	3881.8	4211.1	3065.5
2007	3457.5	4017.3	2675.4	2015	3839.9	4331.3	3199.5

Таблица 2

Годовое потребление энергии и выбросы CO₂ в различных странах

Страна	Подушное потребление в нефтяном эквиваленте, тонн	Нефть, баррелей/сутки на 1000 человек	Электроэнергия, кВт/час/человек	Подушные выбросы углекислого газа, тонн
США	8.1	70.2	12331	19.7
Япония	4.1	42.0	7628	9.1
Германия	4.1	32.5	5963	9.7
Польша	2.4	10.9	2511	8.1
Бразилия	1.1	10.5	1878	1.8
Китай	0.9	4.2	827	2.3
Индия	0.5	2.0	355	1.1
Эфиопия	0.3	0.3	22	0.1

При всех опасениях относительно экологических последствий каменный уголь остается преобладающим энергоносителем при уровне глобальной добычи, достигшей к 2016 году почти 8 млрд. тонн. Данные табл. 3 иллюстрируют современные и предполагаемые уровни потребления каменного угля в различных странах. Как видно, рост потребления каменного угля сконцентрирован в трех странах: Китай, Индия и США, где существуют большие запасы

угля. Спад потребления угля в Западной Европе и в некоторых других регионах связан главным образом с возрастающей ролью природного газа как энергоносителя. Подобный процесс происходит и в США, но при сохранении высоких темпов потребления каменного угля. Хотя нередко высказывается предположение о том, что ограниченность ресурсов каменного угля постепенно приведет к спаду доли использования этого энергоносителя, «отягощенного» экологическими последствиями, подобная ситуация мало вероятна, ввиду огромных запасов угля и его высокой экономической (но не экологической) эффективности как энергоносителя.

Таблица 3

Потребление каменного угля (млн. тонн) в 2001 г. и прогноз на 2025 г.

Регион	2001 г.	2025 г.	Изменение, %
США	1060	1567	47.8
Зап. Европа	574	463	-19.3
Япония	166	202	21.7
б. СССР	446	436	-2.2
Китай	1383	2757	99.3
Индия	360	611	69.7
Остальной мир	1274	3518	20.7
Сумма	5263	7574	43.9

Перспективы замены угля (или природного газа) возобновляемыми источниками энергии все еще остаются очень отдаленными. Более реальные перспективы связаны с разработкой и внедрением «чистых» технологий (в том числе технологии IGCC - Integrated Gasification Gas Combined Cycles - интегрального комбинированного цикла газификации каменного угля, состоящей в трансформации каменного угля в газ, сжигаемый в турбине, что обеспечивает значительное снижение выбросов в атмосферу).

Хотя проблема перехода от углеводородной энергетики к использованию других возможностей производства энергии привлекает все большее внимание правительств и частного бизнеса, факт состоит в том, что уголь, нефть и природный газ все еще остаются доминирующими энергоносителями, причем несомненно, что давление на рынок нефти в предстоящие десятилетия будет повышаться.

По сравнению с нефтью (и особенно с каменным углем) природный газ как энергоноситель и сырьевой ресурс обладает несколькими важными преимуществами: более низкий уровень загрязнений окружающей среды при промышленном и бытовом использовании, а также при производстве электроэнергии, где газ в значительной степени заменил уголь; широкие возможности применения в химической промышленности. В условиях США и многих других стран природный газ стал доминирующим энергоносителем, хотя в сфере транспорта ведущую роль играет бензин.

Мировое потребление энергии является энергетической мерой цивилизации и имеет серьезное значение для социально-экономической и политической сфер человеческой цивилизации. По потреблению энергии существует большая разница между странами. Например, Япония и Германия потребляют 6 кВт энергии на душу населения, а США 11.4 кВт на душу на-

селения. В развивающихся странах, особенно тех, которые находятся в субтропических и тропических широтах, например, в Индии, энергопотребление на душу населения составляет около 0.7 кВт. Бангладеш имеет минимальное энергопотребление, равное 0.2 кВт на душу населения. США потребляют 25% мировой энергии, имея 22% мирового ВВП и 4.59% населения мира. Наиболее значительный рост потребления энергии в настоящее время приходится на Китай. Его население в 1.375 млрд. человек (18.4% населения мира) потребляет энергию в размере 1.6 кВт на душу населения.

Одной из конкурентоспособных отраслей энергетики, безусловно, является атомная энергетика, которая начала несколько десятков лет назад вносить заметный вклад в глобальное производство электроэнергии. Явное преимущество АЭС - отсутствие выбросов аэрозолей и парниковых газов в атмосферу. По состоянию конца 2016 года в мире функционирует 192 АЭС и 448 блоков.

Другим альтернативным источником энергии является водородная энергетика. Несомненно, однако, что практическому осуществлению водородной энергетике должны предшествовать серьезные разработки, касающиеся широкого диапазона проблем от первоначального производства водорода до способов его хранения и распространения и конечного использования в топливных ячейках или другим способом. Возможность реализации подобной перспективы определяется главным образом проблемами стоимости топлива и экологических последствий его использования. Исходными компонентами для производства водорода являются углерод и кислород, а одна из возможных технологий – электролиз, обеспечивающий получение водорода из воды при попутном выделении водяного пара и тепла. Подобная технология очень проста и экологически безопасна, но дорогостояща.

С такой же трудностью (дороговизной) сталкиваются и технологии получения водорода с использованием возобновляемых источников энергии (ветер, солнечная энергия, сжигание биомассы). Современная технология производства водорода опирается на использование содержащих углерод и водорода ископаемых топлив, из которых наиболее подходящим является природный газ, а соответствующая технология значительно более экономична, чем электролиз, но все же по стоимости в 2-4 раза превосходит расходы на получение бензина в расчете на единицу используемой энергии. Следует учитывать, кроме того, и ограниченность ресурсов природного газа, определяющих перспективу повышения его стоимости. Другая сложность технологии, основанной на использовании природного газа, состоит в наличии в данном случае попутных выбросов углекислого газа, т. е. негативных экологических последствий. С точки зрения доступности значительно более перспективен каменный уголь, но в этом случае еще более серьезными становятся экологические последствия. К числу других возможностей принадлежит использование для получения водорода атомной энергии (на основе применения электролиза или высокотемпературной термохимической технологии) и фотохимической трансформации морских водорослей, реалистичность (и прежде всего экономичность) которых требует, однако, тщательного анализа.

Серьезные сложности, безусловно, возникают в связи с решением проблемы распространения и хранения (в частности, на автомобилях) водородного топлива, ввиду малой плотности и пожароопасности водорода. Что касается производства и распространения, то, по-видимому, наиболее целесообразно производство водорода на крупных предприятиях с последующим распространением по газопроводам. Некоторый вклад могут вне-

сти и перевозки сжиженного водорода. Все эти перспективы требуют серьезного технического и экономического анализа, причем особенно сложной окажется, вероятно, проблема хранения водорода на автомобилях. Наконец, недостаточно ясны пока что технические перспективы использования водородного топлива с применением соответствующих топливных ячеек или усовершенствованных двигателей внутреннего сгорания, работающих на водороде вместо бензина.

Таким образом, на пути к массовому внедрению водородного топлива остается целый ряд технических препятствий, преодоление которых потребует серьезных вложений и усилий на протяжении не менее нескольких десятилетий. Такие же не менее сложные проблемы предстоит преодолеть на пути к расширению использования возобновляемых источников энергии.

Если исключить электроэнергетику, то вклад возобновляемых источников энергоресурсов в генерацию электроэнергии остается, в целом, незначительным. Естественно, что среди возобновляемых источников энергии преобладает гидроэнергетика, но, по ряду причин, перспективы ее дальнейшего развития крайне ограничены. Гидроэнергетика обеспечивает 3 % мирового потребления энергии и 15 % мировой генерации электроэнергии. На следующем месте располагается (с большим отрывом) ветроэнергетика, характеризующаяся высокой степенью роста (30 % в год).

Хотя с экологической точки зрения, использование возобновляемых источников энергии обладает бесспорными преимуществами, они никак не могут стать энергетической «панацеей» прежде всего, ввиду их сравнительно высокой стоимости. Так, например, в случае фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии суммарные затраты оказываются в три-четыре раза выше, чем в случае новой технологии IGCC - integrated gasification combined cycle). Технология IGCC для парогазовых установок относится к категории наиболее чистых и эффективных среди чистых угольных технологий. Технология газификации топлива позволяет перерабатывать любое углеродсодержащее сырье, включая уголь, нефтяной кокс, топочный мазут, биомассу и твердые бытовые отходы.

Роль возобновляемых источников энергии в будущем зависит от их конкурентоспособности с невозобновляемыми источниками. Решение этой задачи невозможно без серьезной финансовой поддержки. Главный вывод состоит в том, что в настоящее время и в обозримом будущем сохранится доминирование невозобновляемых источников энергии (ископаемых топлив и атомной энергии), что диктует, в частности, необходимость осуществления соответствующих программ по экологической безопасности при развитии глобальной энергетики по этому пути.

Современное общество потребления и его экологические ограничения

Характерной чертой современной экологической ситуации на Земном шаре, как уже отмечалось выше, является нарастание нестабильности или системного цивилизованного кризиса, глобальность которого выражается в ухудшении среды обитания человечества и животного мира. Наиболее существенной особенностью глобальной экодинамики конца 20-го и начала 21-го веков является:

- быстрый рост численности населения (главным образом в развивающихся странах);

- повышение доли городского населения (значительное возрастание числа мегаполисов);
- расширение масштабов таких опасных заболеваний как ВИЧ/СПИД, гепатит, туберкулез и др.

По оценкам ООН глобальная численность населения возрастет к 2050 г. до 8.9 млрд. чел. Это означает, в частности, что вклад возможного подушного уменьшения потребления (за счет повышения эффективности технологий) в кумулятивное потребление будет перекрыт влиянием роста численности населения. Если, например, потребление мяса средним американцем уменьшится к 2050 г. на 20 % (по сравнению с 2000 г.), то за счет роста населения США общее потребление мяса увеличится на 5 млн. тонн.

Важное общее обстоятельство состоит в том, что, несмотря на доминирующий рост населения в развивающихся странах, их вклад в воздействия на окружающую среду не обязательно превзойдет достигнутый в развитых странах. Так, например, численность населения США увеличивается примерно на 3 млн. человек в год, а в Индии – на 16 млн. человек в год, но воздействие США на окружающую среду (за счет более высокого подушного потребления) окажется более существенным. Это иллюстрируют, в частности, оценки выбросов CO₂ в атмосферу по странам (тонн на человека): Объединённые Арабские Эмираты (38.46), Кувейт (31.31), Австралия (21.99), США (19.4), Канада (17.91), Нидерланды (15.78), Саудовская Аравия (15.73), Казахстан (14.16), Россия (11.83), Украина (7.65), Белоруссия (7.05), Индия (4.9).

Ключевым моментом обеспечения устойчивого развития системы *природа-общество* является соотношение между производством и потреблением, о чем было заявлено на Всемирном саммите по устойчивому развитию в Йоханнесбурге (2002 г.) и на Конференции ООН по устойчивому развитию Рио+20 в 2012 году. Позитивное значение процессов международного сотрудничества в области устойчивого развития – от Стокгольма до Рио, Йоханнесбурга и до настоящего времени – в том, что, несмотря на сложность и противоречивость проблем, они стали мощными импульсами для осмысления, понимания реалей современного мира, угроз его существованию и путей к разрешению кризиса, практическим действиям на всех уровнях.

Значительная часть населения Земного шара (более 1.7 млрд. человек) стала в настоящее время частью *класса потребителей*, причем примерно половина этого населения приходится на развивающиеся страны. За последние десятилетия происходило непрерывное возрастание масштабов потребления в развитых странах, которое может быть названо *революцией потребления*. На 16 % глобального населения, проживающего в США и Западной Европе, приходится 60 % индивидуального потребления, тогда как доля потребления одной трети глобального населения в Южной Азии и субсахарской Африки составляла лишь 3.2 %.

Существенная особенность современного общества потребления состоит в неуравновешенности финансовых расходов по странам и регионам для достижения комфорта или выживания. Это проявляется в уровнях удовлетворения потребностей обеспечения пищей, питьевой водой и школьным образованием беднейшей части населения в мире. Естественно, что необходимость удовлетворения возросшего потребления порождает более высокие требования к масштабам использования природных ресурсов. Именно поэтому глобальные масштабы использования минерального сырья возрастают. Подобный рост значительно превосходит темпы увеличения численности населения при крайней его неоднородности. Так, например, США,

где численность населения составляет около 5% по отношению к глобальной, потребляется около четверти мировых ресурсов ископаемых топлив. США, Канада, Австралия, Япония и Западная Европа с населением около 15% от глобального, ежегодно используют 61% производимого алюминия, 60% свинца, 59% меди и 49% стали. Если ежегодное потребление алюминия средним американцем составляет 22 кг, то в случае среднего индуса оно равно лишь 2кг, а среднего африканца – меньше 1 кг.

Общий вывод, который может быть сделан, состоит в том, что при изобилии пищи и других товаров создаются условия для возникновения нездорового уровня потребления. Росту потребления способствуют дешевая энергия и совершенствуемый транспорт. Следствием этого является усиление воздействий на окружающую среду и природные ресурсы. Почти все экосистемы мира подверглись различным негативным воздействиям. В качестве индикатора воздействия на глобальные экосистемы была введена величина *экологического отпечатка*, характеризующего размер продуктивной площади суши, которая необходима для обеспечения производства потребных ресурсов и усвоения выбросов. Оценки показали, что средний глобальный подушный размер подобной биологически продуктивной территории суши должен составлять 1.9 га, а с точки зрения усвоения выбросов – 2.3 га. Разумеется, эти средние значения маскируют, однако, реальную неоднородность размеров *экологического отпечатка*, варьирующего от 9 га в случае среднего американца до 0.47 га для среднего жителя Мозамбика. С учетом этих цифр становится ясным, что суммарное глобальное потребление превзошло пределы экологической емкости планеты к концу 1970 – началу 1980 гг. Конечно, жизнь в таких условиях возможна лишь при расходовании резервов природных ресурсов, как это происходит, например, в случае грунтовых вод [3].

Избыточное потребление (с точки зрения нагрузки на экосистемы) во многих странах коррелирует со спадом индикаторов здоровья, определяя усиление *болезней потребления*. Продолжающийся рост потребления в промышленно развитых странах и, с другой стороны, серьезные негативные аспекты развития общества потребления определяют необходимость ответов, в частности, на следующие вопросы:

- Характерно ли для глобального класса потребителей наличие более высокого качества жизни, обусловленного ростом потребления?
- Возможно ли сбалансированное потребление (в согласии с требованиями охраны окружающей среды)?
- Осуществимо ли изменение путей развития общества потребления с целью обеспечения устойчивого развития?
- Может ли общество сделать приоритетным удовлетворение потребностей всех его членов?

Совершенно ясно в этой связи, что концепция экономики общества потребления, исходящая из возможности неограниченного потребления, порочна с позиции неизбежных последствий такого пути развития для окружающей среды. Следствием осуществления подобной концепции оказывается нарушение необходимых экономических, экологических и социальных ограничений (порогов). Главный вывод состоит в том, что общество потребления не имеет перспективы.

Обратимся теперь к анализу состояния некоторых наиболее существенных систем жизнеобеспечения, таких как запасы пресной воды и энергии. Проблемы пресной воды привлекают особое внимание, поскольку, с одной стороны, вода является ключевым компонентом экосистем, а, с другой сто-

роны, - около одной трети мирового населения угрожает хронический дефицит воды уже через несколько десятилетий. Это и другие обстоятельства определили провозглашение Десятилетия пресной воды ООН (2005-2015 гг.). Следующие факты характеризуют современное состояние глобальных водных ресурсов [31]:

- Общий объем водных ресурсов на Земле составляет примерно 1.4 млрд. км³.

- Объем пресноводных ресурсов равен примерно 35 млн. км³, или 2.5 % от общего объема воды.

- Из этих пресноводных ресурсов около 24 млн. км³, или 68.9%, существуют в виде льда и постоянного снежного покрова в горах, Антарктике и Арктике.

- Около 8 млн. км³, или 30.8%, находятся под землей в форме грунтовых вод (в мелких и глубоких бассейнах грунтовых вод глубиной до 2000 метров), почвенной влаги, болотной воды и вечной мерзлоты.

- В пресноводных озерах и реках содержится примерно 105000 км³, или 0.3% мировых запасов пресной воды.

- Общий объем запасов пригодной к потреблению экосистемами и населением пресной воды составляет примерно 200000 км³, т.е. менее 1% всех запасов пресной воды.

- 3011 пресноводных биологических видов внесены в перечень видов, находящихся под угрозой, или исчезнувших видов, 1039 из них – это рыбы. Четыре из пяти существующих видов речных дельфинов и два из трех существующих видов ламантинов, примерно 40 видов пресноводных черепах и более 400 видов пресноводных моллюсков находятся под угрозой уничтожения.

- Годовой забор грунтовых вод оценивается в 600-700 км³, или около 20% мирового забора воды. Около 1.5 млрд. человек используют для питья грунтовые воды.

- На сельское хозяйство приходится около 70 % мирового расхода пресной воды.

- Потребление воды на душу населения в развитых странах в среднем примерно в 10 раз больше, чем в развивающихся странах. В развитых странах этот показатель варьируется в диапазоне от 500 до 800 литров в сутки, а в развивающихся странах – от 60 до 150 литров в сутки.

- На промышленное потребление приходится около 20 % мирового забора пресной воды. От 57 до 69 % мирового забора воды используется для производства электроэнергии на гидроэлектростанциях и атомных электростанциях, 30-40 % – в промышленных процессах, а 0.5-3 % – для нужд тепловой энергетики.

В целом следует констатировать, что снабжение чистой водой в достаточных количествах имеет фундаментальное значение для достижения целей социально-экономического развития и охраны окружающей среды. Серьезное беспокойство вызывают, в этой связи, усиливающиеся антропогенные воздействия на окружающую среду. Например, площадь пресноводных водоемов, играющих важную роль в природном очищении вод и в формировании круговорота воды, за последние 20 лет уменьшилась примерно вдвое.

Географическое распределение ресурсов пресной воды крайне неравномерно: около половины глобальных ресурсов приходится на долю шести

стран (Бразилия, Россия, Канада, Индонезия, Китай, Колумбия), причем подобная неравномерность характерна и для отдельных стран. Так, например, в Китае, располагающем 7% ресурсов пресных вод (при доле населения по отношению к глобальному, равной 21%), большая часть страны является аридной. Естественно, что страны с дефицитом воды вынуждены прибегать к широкому использованию грунтовых вод, что порождает постепенное понижение уровня грунтовых вод.

Кроме всего прочего, эти данные отчетливо иллюстрируют существующие в мире социально-экономические контрасты. Примерно каждый пятый человек в развивающемся мире (их общее число составляет около 1.1 млрд.) ежедневно подвергается риску заболеваний из-за отсутствия доброкачественной питьевой воды. При этом главная проблема состоит не в отсутствии воды вообще, а в неблагоприятных социально-экономических условиях.

Как известно, основным потребителем пресной воды рек, озер и подземных источников является сельское хозяйство (около 70 % в глобальных масштабах и до 90 % во многих развивающихся странах). Поскольку расширяющееся использование ирригации натолкнется уже в ближайшем будущем на ограниченность ресурсов пресной воды, все более актуальное значение приобретает эффективность использования пресной воды, возможность повышения которой весьма значительна. Это относится, в частности, к применению микроиригации (в том числе капельного орошения), масштабы которого остаются, однако, весьма ограниченными.

Значительный потенциал экономии воды связан с производством продуктов питания. Например, производство 10 г белка в форме говядины требует в пять раз более значительных затрат воды, чем в случае риса, а при обеспечении 500 пищевых калорий подобное различие достигает 20 раз. При обильном мясном питании средний американец требует затрат 5.4 л. воды в сутки, тогда как в случае вегетарианского питания эти затраты вдвое меньше.

Серьезную проблему составляет водообеспечение городов и осуществление мер по экономии воды. Еще более острой является проблема промышленного использования пресной воды, на долю которого приходится 22 % используемых (в глобальных масштабах) ресурсов пресной воды (59 % в промышленных и 10 % в развивающихся странах).

Разработанная ЮНЕП концептуальная программа «Изменения окружающей среды и потребности человека: оценка взаимосвязей» содержит обоснование приоритетов в части, касающейся окружающей среды и целей развития на тысячелетие. основополагающим для этой программы обстоятельством является необходимость учета взаимосвязанности ключевых проблем экодинамики, определяемой наличием большого числа обратных связей в системе *природа-общество* и нелинейности, за счет которой могут возникать *пороговые эффекты*, а также синергизма технологий и экологической политики. Многочисленные иллюстрации актуальности учета различной взаимосвязанности содержит проблематика глобальных изменений климата. Адекватный анализ роли обратных связей и нелинейности системы *природа-общество* серьезно осложняет фрагментарность имеющейся информации. В этой связи вызывает огорчение то обстоятельство, что до сих пор не получила должного признания концепция биотической регуляции окружающей среды, развитая российскими учеными и которая могла бы составить концептуальную основу для решения проблем глобальной экодинамики [4-13,18-25]. Важное обстоятельство состоит в том, что *биосферные механизмы* положены и в основу системы жизнеобеспечения обитаемых

космических аппаратов. К сожалению, концепция биотической регуляции остается незамеченной на Западе, иллюстрацией чего является, в частности, недавняя полемика по поводу концепции «Гайя», в которой нашли отражение риторические суждения о Земле как автотрофном саморегулирующемся «суперорганизме». Безусловно, что поддержание устойчивости окружающей среды является одной из главных целей всех живых организмов. Поэтому выделение приоритетов глобальной экодинамики и поиск реальных путей выхода на устойчивое развитие является важной задачей современной науки.

Образование и глобальная экоинформатика

Активизация процессов глобализации практически во всех сферах деятельности современной цивилизации за последние десятилетия обострила и породила многочисленные проблемы взаимодействия человеческого общества с природой. Стало очевидным, что для решения этих проблем необходимо разрабатывать новые концепции и подходы к интерпретации глобальных изменений окружающей среды, позволяющие выделять приоритетные направления исследований и давать надежную оценку состояния системы *природа-общество*. Одним из таких приоритетов является прогноз изменений глобальной экодинамики [6,9,12]. Неослабевающий интерес к этой проблеме, определяемый большим её практическим значением и противоречивостью имеющихся оценок антропогенного вклада в изменения природной среды, диктует необходимость систематизации знаний и данных о происходящих изменениях в различных системах окружающей среды. Решение возникающих здесь задач возможно лишь в рамках широкого образовательного процесса, соединяющего многие традиционные научные дисциплины в единую образовательную программу. Путь к созданию такой программы указывает новая научная дисциплина, получившая название глобальной экоинформатики [23,24], которая является путем к устойчивому развитию.

Проблема глобальных изменений окружающей среды является предметом широкой дискуссии среди специалистов в области наук о Земле, экономистов, демографов и политиков. Хотя понятие глобальных изменений можно считать в достаточной степени утвердившимся, несмотря на сохраняющиеся многочисленные терминологические расхождения (особенно это относится к определению *устойчивого развития*), заметим, что речь идет главным образом о взаимодействии общества (социально-экономического развития) и природы. Наиболее существенные особенности глобальных изменений состоят в их многокомпонентности, интерактивности и нелинейности. Эти особенности в такой степени осложняют прогностические оценки, что понятие прогноза было вытеснено за последние годы значительно более расплывчатой концепцией *сценариев*. Неопределенность сценариев еще более усиливается в связи с тем, что, как правило, отсутствуют вероятностные оценки для различных сценариев (это полностью относится, например, к проблематике глобальных изменений климата).

Одним из возможных механизмов преодоления указанных неопределенностей является интенсивно развивающееся в последнее десятилетие новое научное направление – глобальная экоинформатика, в рамках которой созданы информационные технологии, обеспечивающие совместное использование разноплановых данных о прошлом и текущем состоянии системы *природа-общество* (СПО). Важным шагом в глобальной экоинформатике можно считать создание модели функционирования СПО, опирающейся

на базы знаний и данных и вписывающейся в адаптивно-эволюционную концепцию геoinформационного мониторинга, которая позволяет осуществлять взаимную коррекцию модели СПО и режима сбора глобальных данных. В результате возникает возможность постановки задачи оптимизации планирования организационно-поведенческой структуры СПО, что вселяет надежду на обеспечение целевой направленности глобальных изменений на пользу человеку и без ущерба для природы и, что самое главное, создания международных механизмов согласованного природопользовательского поведения всего населения Земли.

В 1972 г. был опубликован первый доклад Римского Клуба (РК) [1,2,17], вызвавший большой интерес во всем мире. В 1972 г. в Стокгольме состоялась Международная конференция по окружающей среде, также вызвавшая широкий международный резонанс. В последующие годы внимание разработок по проблематике глобальных изменений было сконцентрировано главным образом в рамках Международной геосферно-биосферной программы (МГБП) и Всемирной программы исследований климата (ВПИК), которые позднее были дополнены Международной программой изучения «человеческих измерений» динамики окружающей среды (МПЧИ или ИИДР имея в виду отсутствие общепринятой аббревиатуры на русском языке). Эти и сопутствующие им международные и национальные программы исследования окружающей среды позволили создать обширные базы глобальных данных о различных компонентах СПО и, в частности, зафиксировать их тренды за последние десятилетия.

Цель исследований, проводящихся в рамках глобальной экоинформатики, состоит в том, чтобы попытаться критически проанализировать итоги разработок по проблематике глобальных изменений за прошедшие десятилетия и (что самое главное) ответить на вопрос: почему, несмотря на гигантские усилия и огромные затраты глобальная экологическая ситуация не только не улучшилась, но продолжает ухудшаться.

Само название монографии «Пределы роста» [17] отображало появление новой основополагающей концепции: развитие человеческого общества (численность населения и расширение масштабов хозяйственной деятельности) не может быть безграничным и уже приближалось к достижению определенных пределов – прежде всего с точки зрения уровней использования невозобновимых природных ресурсов. Главные цели разработок РК состояли в анализе глобальной демографической динамики и оценках природных ресурсов, а также в обосновании модели глобальной экодинамики и возможных сценариев экодинамики будущего. Авторы сформулировали главные цели следующим образом: «Задача проекта состоит в том, чтобы изучить комплекс проблем, беспокоящих людей всех наций: нищета в окружающей изобилия; деградация окружающей среды; потеря доверия к общественным институтам; неконтролируемое распространение городов; ненадежная занятость; отчужденность молодежи; пренебрежение традиционными ценностями; инфляция и другие экономически разрушительные явления». Еще три десятилетия тому назад участники РК справедливо подчеркнули комплексность и интерактивность проблем, включающих технические, социальные, экономические и политические аспекты.

Meadows и др. [17] все прогнозные оценки выполнили на глобальной модели, структурное описание которой не вызывает возражений, но, как следует из последующих публикаций [10,13], модель не учитывает множество бесспорных связей (прямых и обратных) между человеческим обществом и природой, а также, что принципиально важно, их пространственную не-

однородность. Тем не менее, сделанные прогнозы концептуально поставили множество проблем перед специалистами в области глобального моделирования и побудили их к развитию эффективных технологий контроля окружающей среды. Более того, становится очевидным, что затронутые Meadows и др. [17] проблемы нельзя разрешить без привлечения систем глобального наблюдения за окружающей средой.

Следует отметить, что за прошедшие годы благодаря усилиям многих ученых сформулированы ключевые приоритеты глобальной экодинамики и наметились перспективные тенденции в решении многих возникающих здесь проблем. Стало ясно, что для выработки глобальной стратегии устойчивого развития необходим конструктивный формализованный подход к описанию СКПО, учитывающий ее многомерность и многокомпонентность, а также нелинейность и интерактивность происходящих в ней процессов. Многие связи в СКПО обострились и стали превалировать над другими связями. Наконец, наметилась тенденция к возрастанию смертности населения. Все это изменяет концепцию глобальной модели и требует поиска новых информационных технологий управления трендами в СКПО.

Модель РК ограничивалась достаточно узким спектром отражаемых в ней взаимодействий (уровней в СКПО: население, капитал, загрязнение, производство пищи, минеральные ресурсы). Кроме того, модель не учитывала прямую роль биосферных связей и не рассматривала пространственную неоднородность этих взаимодействий. Поэтому она не могла дать объективного прогноза даже в рамках удачно сформулированных сценариев, которые, тем не менее, вносили в модель множество неопределенностей с широким спектром возможных исходов. Сравнение модели Meadows и др. [17] с моделью мировой динамики Форрестера [26] показывает их концептуальную идентичность как по диаграмме взаимосвязей уровневых переменных, так и по идейной основе. В зависимости от вариации исходных предположений (сценариев) об ограниченности или неограниченности не возобновимых ресурсов, а также о стабилизации численности населения результаты прогнозных оценок состояния компонентов СКПО качественно совпадают у обеих моделей, но существенно расходятся с реальностью конца 20-го столетия. Основное расхождение состоит в оценке численности населения, скорость роста которого в 90-х годах стабилизировалась на величине около 80 млн. чел./год, пройдя свой максимум 87 млн.чел./год в конце 80-х годов и вернувшись в начале 21-го столетия к уровню 70-х годов прошлого столетия. Это объясняется тем, что учитываемые в модели РК (а также и в модели Форрестера) корреляции со временем претерпели непредсказуемые изменения в связи с активизацией ранее слабо проявлявшихся обратных связей в СКПО.

Понимание структуры и значимости разнородных и сложных связей в современном мире меняется достаточно быстро вместе с их трудно предсказуемой динамикой. Так, благодаря расширению торговых связей, транспортных и информационных сетей за прошедшие годы возросла пространственная корреляция между экологическими, демографическими, политическими и экономическими событиями.

Одно из существенных расхождений модели РК с современным миром связано с концепциями использования минеральных ресурсов и производства пищи. Сейчас совершенно очевидно, что такие компоненты функционирования глобальной СКПО как альтернативные источники энергии, энергосберегающие системы и технологии, рождаемость и смертность, производственная структура населения и его миграция, реакции природы на

антропогенные воздействия и многие другие ключевые индикаторы требуют адекватной параметризации и отражения в схеме модели. Например, за последние 20 лет в сфере производства пищи резко возрасла роль аквакультуры, роль которой в изменении биоразнообразия остается не изученной [14].

За это время продукция глобальной аквакультуры увеличилась от 1.6 млн. тонн в 1960 г. до 6.9 млн.т. в 1984 г. и с 33.3 млн.т. в 1999 г. до 66.6 млн. тонн в 2012 г. с учетом того, что в 2012 г. вылов рыбы составил 91.3 млн. тонн. Причем, этот рост был неоднородным в пространстве и по компонентам продукции.

Также весьма сложным должен быть компонент глобальной модели, отвечающая за ископаемые топлива. В самом деле, имеется не менее десяти уже хорошо изученных альтернативных механизмов экономного их использования и замены. Этот аспект в модели РК присутствует лишь в примитивной форме нескольких сценариев.

Из имеющихся глобальных данных следует, что предсказанное моделью РК уменьшение или стабилизация производства пищи на каждого жителя планеты по состоянию на начало 21-го столетия не оправдалось. Это естественно, так как производство пищи определяется более сложной цепочкой причинно-следственных связей, чем это заложено в моделях РК и Форрестера. Отметим, однако, что в целом производство зерна, мяса и других элементов пищевого рациона человека, хотя и претерпевало подъемы и спады, не дает повода для пессимистических прогнозов на ближайшие десятилетия.

Как отмечено выше, за последние годы резко возросло производство рыбной продукции. Ясно, что в глобальной модели должны быть учтены биопродукционные процессы в Мировом океане и внутренних водоемах, чтобы иметь возможность оценить пределы их возможностей по производству пищи. Что касается производства зерна, то на рубеже двух столетий наблюдалось некоторое снижение темпов его производства и возрастание потребления. Так, производство зерна в 2001 г. было 299 кг/чел, что ниже этого показателя в 1984 г. на 14%. В тоже время, если рассматривать долгосрочный тренд производства зерна, то в период с 1950 г. до 1984 г. оно возросло на 38%. В целом, производство, например, пшеницы в 2014 г. составило 729 млн. тонн, что больше на 2.5%, чем в 2013 г. и на 15.3% по сравнению с 2004 г.

Наблюдавшееся преобладание потребления зерна над его производством и соответствующее снижение его мировых запасов несомненно является лишь кратковременной флуктуацией процесса производства пищи. Другие составляющие пищевого рациона населения характеризуются положительными градиентами их производства, хотя и неравномерно распределенными по странам и континентам. Например, производство мяса (говядины, свинины и домашней птицы) постепенно из года в год примерно со скоростью 2%. Так, в 1960 г. общее производство мяса составило 44.919 млн. тонн, а уже в 2000 г. оно достигло 192.146 млн. тонн, и продолжало увеличиваться до 260.494 млн. тонн в 2016 г. Начиная с 1950 г. подушное производство мяса удвоилось с $17.2 \text{ кг}\cdot\text{чел}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ до $31.5 \text{ кг}/\text{чел}/\text{год}$ в 2000 г. В 2001 г. наибольший рост отмечен в производстве свинины и домашней птицы. В 2016 г. производство мясной продукции на душу населения достигло $36.2 \text{ кг}/\text{чел}/\text{год}$.

Наконец, что касается одного из ключевых индикаторов состояния СКПО, а именно невозобновимых природных ресурсов, то здесь концепция РК о непрерывном их сокращении и лимитирующей роли в развитии дру-

гих уровней СКПО расходится с реальными тенденциями рубежа двух столетий. Реально мировая добыча угля, нефти и природного газа растет со скоростью 1-2% в год. Объемы потребления ископаемых топлив также растут, хотя и неравномерно по странам и типам топлив. В целом по земному шару рост потребления нефти, угля и газа характеризуется величинами 0,2%, 3,2% и 1,2% соответственно. К тому же наблюдается рост использования ядерной и солнечной энергии, энергии ветра и быстрое развитие энергосберегающих технологий. Поэтому зависимость мировой динамики от энергетических ресурсов должна параметризоваться не на основе упрощенных моделей, а с учетом всего спектра доступной информации о природе многозначных обратных связей в СКПО и, особенно, с учетом тенденций научно-технического прогресса.

За тридцатилетний период с появления прогнозов РК и соответствующей мировой модели был достигнут серьезный прогресс в области глобального моделирования. Основой нового подхода стало представление о СКПО как о самоорганизующейся и самоструктурирующейся системе, согласованность действий элементов которой во времени и пространстве обеспечивается процессом естественной эволюции. Антропогенная составляющая в этом процессе направлена на нарушение этой целостности. Попытки параметризовать на формальном уровне процесс коэволюции природы и человека, как элементов биосферы, связаны с поиском единого описания всех процессов в СКПО, которое бы объединяло усилия различных отраслей знания в познании окружающей среды. Такое синергетическое начало лежит в основе многих работ по глобальному моделированию [6,7,11,13,18,25].

Взаимодействия в СКПО рассматриваются как взаимодействия между природными и антропогенными элементами внутри указанных пространственных структур, а также между ними. Комплексная модель СКПО реализует пространственную иерархию гидродинамических, атмосферных, экологических и социально-экономических процессов с учетом деления всего объема окружающей среды на однородные структуры – географические пиксели, которые являются опорной сеткой в численных схемах при решении, основанном на динамических уравнениях или при синтезе рядов данных в обучающих процедурах эволюционного типа. Пиксели неоднородны по параметрам и функциональным характеристикам. Именно через эту неоднородность осуществляется привязка глобальной модели к базам данных. Более того, чтобы избежать избыточности в структуре глобальной модели, априори предполагается, что все учитываемые в ней элементы и процессы СКПО имеют характерную для них пространственную дискретизацию. Неоднозначность пространственных дискретизаций в различных блоках глобальной модели устраняется на алгоритмическом уровне согласования потоков данных от системы мониторинга. В результате структура модели не зависит от структуры базы данных, а, следовательно, не изменяется с изменением последней. Аналогичная независимость обеспечивается и между блоками модели. Это реализуется обменом данными между ними только через входы и выходы под контролем базовой информационной магистрали, как это показано на схеме рис. 1. В случае отклонения одного или нескольких блоков их входы идентифицируются с соответствующими входами в базу данных. Тогда использование модели в режиме имитационного эксперимента схематически может быть представлено процессом, где по выбору пользователя осуществляется формирование пространственного образа моделируемой среды и режима управления имитационным экспери-

ментом. Безусловно, при этом пользователь должен обладать определенной базой знаний и располагать методикой ее структуризации. Например, он может использовать перечни ключевых проблем глобальной экологии или списки рекомендованных для исследования элементов СКПО.

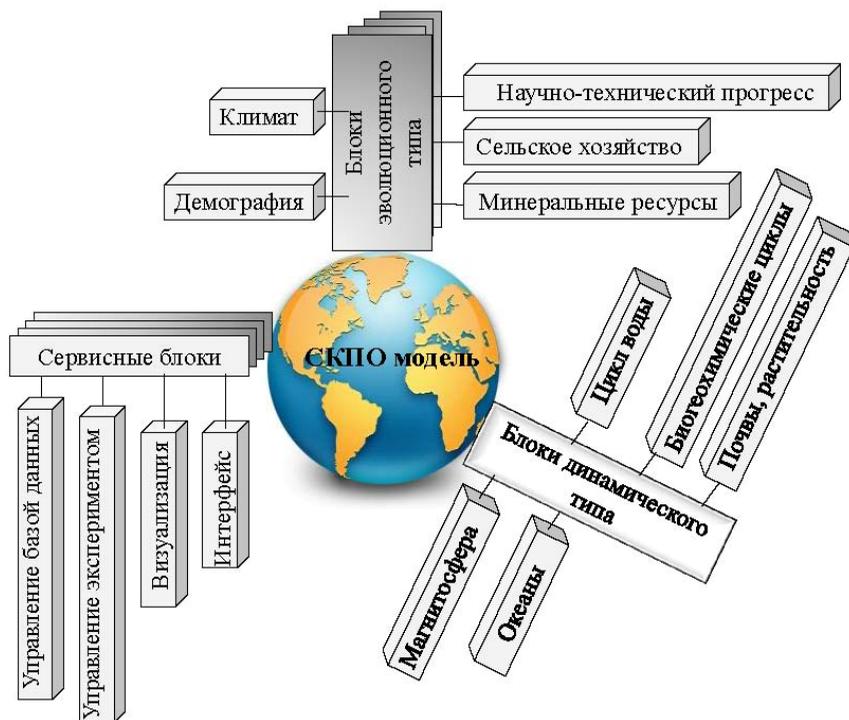


Рис. 1. Блочная структура глобальной модели СКПО.

Характер пространственной структуры глобальной модели, несомненно, определяется базой данных. Самый простейший вариант точечной модели реализуется при задании исходной информации в форме усреднения по поверхности суши и всей акватории Мирового океана. Учет пространственной неоднородности обеспечивается разнообразными формами дискретизации пространства. Базовой формой пространственного деления суши и океанов является задание равномерной географической сетки. Реализация реального варианта использования модели обеспечивается интегрированием ячеек поверхности планеты так, что в каждом блоке могут присутствовать различные формы пространственной структуры учитываемых элементов и процессов биосферы. Такая гибкость задания пространственной структуры биосферы дает возможность легко адаптировать модель к неоднородностям в базах данных и осуществлять имитационные эксперименты с актуализацией отдельных регионов.

В зависимости от специфики рассматриваемого природного процесса структура регионального деления может быть идентифицирована с климатическими зонами, континентами, широтными поясами, социально-административной структурой и природными зонами.

Таким образом, синтез версий глобальной модели требует предварительного анализа сложившейся к настоящему моменту ситуации с базами глобальных данных и базами знаний. Здесь исследователи сталкиваются с принципиальными трудностями, среди которых в первую очередь следует указать на отсутствие адекватной базы знаний о климатических и биосферных процессах, а также на большую разрозненность существующих баз данных о глобальных процессах на суше, в атмосфере и океанах.

Другая принципиальная трудность связана с неспособностью современной науки сформулировать требования к базам глобальных данных, необходимых для достоверной оценки состояния природной среды и уверенного прогноза ее развития на достаточно большой промежуток времени. Более того, не существует технологии формирования баз данных, нацеленной на создание глобальной модели. Поэтому расширенное изучение проблем глобальной экодинамики в ВУЗах и создание учебников со взвешенным изложением этих проблем является одним из возможных путей выхода из возникших противоречий между общественным развитием и природной средой.

Попытки найти ответы на поставленные вопросы предпринимали многие ученые. Одним из эффективных способов разрешения этих вопросов признается создание единой планетарной адаптивной геоэкологической информационно-моделирующей системы (ГИМС, рис. 2), обладающей иерархической структурой сбора данных и формирующей многоуровневую глобальную базу данных. Адаптивный характер этой системы обеспечивается коррекцией режима сбора данных, а также изменением параметров и структуры глобальной модели.

Создание глобальной ГИМС возможно с учетом уже существующей структуры баз данных, формирование которых продолжается в рамках Международной Геосферно-Биосферной Программы «Глобальные изменения» и многочисленных национальных экологических и природоохранных программ. Созданная к настоящему времени система мировых центров данных способствует быстрому использованию накопленных сведений о глобальных процессах и облегчает синтез ГИМС. Однако значительные успехи в этом направлении, связанные с большими экономическими затратами, не могут привести к успешному решению задачи глобального контроля за окружающей средой. Хотя этот этап и является неизбежным.

Для контроля глобальной геобиосистемы Земли необходимо регулярное наблюдение за четко определенным перечнем ключевых переменных. С увеличением вероятности довольно резких глобальных изменений спектр этих переменных будет варьироваться, а глобальная прогнозирующая система должна постоянно модернизироваться. Методологическое обоснование информационной полноты комплекта переменных для системы мониторинга может быть объективным только в случае функционирования ГИМС. Ведь многие из входящих в этот перечень переменных могут быть рассчитаны на основе соответствующих моделей, и их не нужно будет измерять. Однако пока планирование измерений и разработка моделей ведутся параллельно, и не существует обнадеживающих результатов в области планирования глобального эксперимента.

Встраивание глобальной модели в структуру ГИМС позволяет перевести ее на уровень экспертной системы. А это означает, что возникает возможность комплексного анализа большого числа элементов СКПО в условиях реализации гипотетических ситуаций, которые могут возникать по естественным или антропогенным причинам.

Проследив подходы к оценке динамики СКПО, начиная с Форрестера [1,2] и Медоуза и др. [16] и заканчивая недавними работами, нельзя не сделать вывод о том, что оптимистый прогресс в поиске путей достижения глобального устойчивого развития может быть сделан лишь при комплексном взвешенном системном подходе к многофункциональному мониторингу СКПО. Заслуга авторов Римского Клуба не в том, что впервые более 40 лет назад был сделан акцент на назревшем противоречии между ростом численности населения и ограниченностью земных ресурсов, а в том, что, пожалуй, впервые после работ В.И. Вернадского была сделана попытка использовать математическое моделирование для изучения эволюции СКПО. Безусловно, модель РК существенно упрощает реальные внутренние связи СКПО, описывая взаимодействия ее элементов усредненными косвенными зависимостями, не учитывая напрямую экономических, экологических, социальных и политических законов. Возможность такого учета возникла позднее в связи с работами в области имитационного и эволюционного моделирования и теории оптимизации взаимодействия сложных систем, в результате которых были созданы методики и алгоритмы прогнозной оценки динамических процессов в условиях априорной неопределенности [10,13]. Однако, проблема создания глобальной модели, адекватной реальному миру, остается трудно реализуемой и в современных условиях. Действительно, с одной стороны, полный учет всех параметров СКПО приводит нас к непреодолимой многомерности и информационной неопределенности с неустранимыми последствиями. Кроме того, в таких областях, как физика океана, геофизика, экология, медицина, социология и др. создание адекватных параметризаций реальных процессов, повидимому, будет всегда проблематичным из-за недостижимости полноты информации. Тем не менее, поиск новых эффективных путей синтеза глобальной системы контроля за состоянием СКПО, опирающейся на адаптивные принципы использования глобальной модели и обновляемых баз данных, кажется перспективным и вселяющим надежду на получение достоверных прогнозов динамики СКПО. Предварительные расчеты с использованием ГМСКПО показали, что роль биотической регуляции в СКПО недооценивалась, а прогнозы, например, уровней парникового эффекта преувеличивались.

Наконец, объединение широко известных и менее распространенных концепций выживания современной цивилизации в единую стройную совокупность взаимосвязанных теорий, законов, правил, принципов и гипотез в рамках ГИМС-технологии позволит создать эффективное средство глобального контроля СКПО и принятия решений на уровне ООН или другого компетентного международного органа. Такого развития событий, повидимому, не избежать. В противном случае человечество все более и более будет разрушать среду обитания до черты не возврата, когда природа ликвидирует последние надежды на выживание человечества. Очевидно, что сложность природы определается многообразием ее состояний, характеризуемых определенными индикаторами, среди которых есть три базовых: изменение климата, опустынивание планеты и сбой в действии системного принципа Ле Шателье-Брауна.

Действительно, человечеству пора осознать, что только комплексное, а не отдельно у экологов, экономистов и политиков, рассмотрение ключевых механизмов эволюции СКПО позволит найти ключ к устойчивому развитию. Возникает естественный вопрос о том, когда же эта простая истина станет понятной и реализуемой. Очевидно, что глобальные риски сложно оценить без привлечения новейших информационно-моделирующих технологий, опирающихся на современные знания практически во всех областях науки. Одними из формальных механизмов оценки состояния среды обитания человека являются индикаторы, такие как индикатор выживания и индикатор биологической сложности [13,15,16].

Соотношение живой и неживой субстанций определяет живучесть природной системы и отвечает на вопрос, является ли она живой. Переход между крайними состояниями природная система осуществляет за счет изменения своей сложности, индикатор которой и может служить предвестником наступления критического состояния [26-29]. В частности, такие переходы могут реализовываться под воздействием изменений климата. Успех поиска таких индикаторов зависит от того, насколько мы хорошо знаем законы живого мира и его эволюции. Развитые базовые концепции экологии позволяют утверждать, что живые системы любого уровня реагируют на приближение природной катастрофы, которая путем воздействия на экосистему может приводить к увеличению ее биологической сложности. Особенно это проявляется в океанах за счет образования новых апвеллинговых зон при прохождении мощного циклона.

Очевидно, что для оценки, например, состояния растительной экосистемы и принятия решения о выборе способа предупреждения негативных последствий антропогенного вмешательства в ее динамику необходимо иметь критерии и индикаторы, которые могут иметь качественный или количественный вид. Этот вопрос начал обсуждаться на конференции РИО-92. В различных регионах мира понятия критериев и индикаторов имеют довольно различное толкование. Некоторые критерии и индикаторы сфокусированы на национальных интересах взаимодействия населения с растительными сообществами. Тем не менее, несмотря на существующие различия в подборе критериев и индикаторов они являются средством для оценки тренда в развитии лесных и агролесных экосистем. Например, Международная организация тропической древесины (ИТТО – International Tropical Timber Organization) в 1992 г. ввела семь критериев:

- 1) Обеспечение условия для устойчивого управления лесом.
- 2) Безопасность лесного ресурса.
- 3) Здоровье лесной экосистемы.
- 4) Продуктивность лесной экосистемы.
- 5) Биологическое разнообразие лесной экосистемы.
- 6) Состояние почвы и водных ресурсов в лесной экосистеме.
- 7) Экономические, социальные и культурные характеристики лесной экосистемы.

На основе этих критериев Центр по исследованию международных проблем лесной промышленности (CIFOR – Center for the International Forestry Research) создал экспертную систему CIMAT (Criteria and Indicators Modification and Adaptation Tool), которая в зависимости от локальных условий генерирует иерархию принципов, критериев, индикаторов и других показателей состояния лесной экосистемы.

Крапивин и др. [13] предложили критерий выживания и критерий биологической сложности, которые зависят от динамики многих характеристик окружающей среды, включая суммарную биомассу и объемы производимой пищи. Формальное описание биологической сложности СКПО при выделении m подсистем сводится к регистрации взаимодействий между ними в форме матрицы $X = \|x_{ij}\|$, где $x_{ij}=0$ в случае отсутствия взаимодействий между подсистемами i и j и $x_{ij} \neq 0$ в противоположном случае. Тогда любая точка $W_N \in \Psi = [0,1]$ шкалы биологической сложности Ψ определяется как взвешенная сумма:

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

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

Индикатор выживания может быть сформирован на основе индикатора биологической сложности:

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

Таким образом, индикатор $W_N(\varphi, \lambda, t)$ выступает как интегральный показатель сложности СКПО, отражая индивидуальность ее структуры и поведения в каждый момент времени t в пространстве Ξ . В соответствии с законами естественной эволюции уменьшение (увеличение) величины W_N будет отслеживать возрастание (сокращение) биоразнообразия и способности природно-антропогенных систем к выживанию. Так как уменьшение биоразнообразия нарушает замкнутость биогеохимических круговоротов и приводит к увеличению нагрузки на не возобновляемые ресурсы, то бинарная структура матрицы X сдвигается в направлении усиления позиций ресурсо-источающих технологий, и вектор энергетического обмена между подсистемами СКПО смещается в состояние, когда уровень ее выживаемости понижается.

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

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (Грант РФФИ №16-01-00213-а).

Литература (References)

1. Forrester J.W. World dynamics. Cambridge. Mass.: Wright - Allen Press, 1971. 150 pp.
2. Forrester J.W. World dynamics. New York: Productivity Press Publishing. 1979. 142 pp.
3. Kinzelbach W., Bauer P., Siegfried T., Brunner P. Sustainable groundwater management – problems and scientific tools // Epizodes, 2003. V.26. Nr. 4. P. 279-284.
4. Kondratyev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F., Varotsos C.A. Atmospheric Aerosol Properties: Formation, Processes and Impacts. - Chichester, UK: Springer/Praxis. 2006. 572 pp.
5. Kondratyev K.Ya. Key aspects of global climate change // Energy & Environment. 2004. Vol. 15. No. 3. P. 469-503.
6. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W. Global environmental change: modeling and monitoring. - Berlin: Springer. 2002. 319 pp.
7. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Global carbon cycle and climate change. - Chichester, U.K.: Springer/Praxis. 2003. 343 pp.
8. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Natural Disasters as Interactive Components of Global Ecodynamics. Springer/Praxis, Chichester, UK, 2006. - 579 pp.
9. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P., and Varotsos C.A. Global ecodynamics: A multidimensional analysis. - Chichester U.K.: Springer/Praxis. 2004. 658 pp.
10. Krapivin V.F., Shutko A.M. Information technologies for remote monitoring of the environment. Chichester U.K.: Springer/Praxis, 2012. 498 pp.
11. Krapivin V.F. and Varotsos C.A. Biogeochemical cycles in globalization and sustainable development. - Chichester, U.K.: Springer/Praxis. 2008. 562 pp.
12. Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Globalization and sustainable development. -Chichester, U.K.: Springer/Praxis. 2007. 304 p.
13. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making. London: Springer, 2015. 903 pp.
14. Lucas J.S., Southgate P.C. Aquaculture: Farming aquatic animals and plants. Wiley-Blackwell, New York. 2012. 648 pp.
15. Makarieva A.M.and Gorshkov V.G. The Biotic Pump: Condensation, atmospheric dynamics and climate // International Journal of Water. 2010. Vol.5. No.4. P. 365-385.
16. Makarieva A.M.and Gorshkov V.G. Stability of the information of life. Part I. Preventing the decay of the genetic information of life. Part II. Evolution and progress // Energy: Economics, Technology, Ecology. 2016. No. 3. P. 47-54; 2016. No. 4. P. 42-49.
17. Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J., Behrens W.W. The Limits to Growth. New York: A Potomak Associates Book. 1972. 208 pp.
18. Nitu C. and Krapivin V.F. Simulation model of the nature-society system // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty. 2014. Vol. 26, No.2. P. 27-33
19. Nitu C., Dobrescu A.S., Krapivin V.F., and Shutko A.M. Mobile sensing platform for environmental monitoring // Proceedings of the 20th International Conference on Control Systems and Computer Science, 27-29 May 2015, Bucharest, Romania. Bucharest: IEEE. 2015. P. 952-958.

20. Nitu C., Krapivin V.F., and Bruno A. Intelligent techniques in ecology. - Bucharest: Printech. 2000. 150 pp.
21. Nitu C., Krapivin V.F., and Bruno A. System modelling in ecology. - Bucharest: Printech. 2000. 260 pp.
22. Nitu C., Krapivin V.F., and Dobrescu A.S. Application of a global model to the study of Arctic Basin pollution// The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, Valahia University of Targoviste, Romania, 2010, Vol. 12, No. 1, pp. 111-114.
23. Nitu C., Krapivin V.F., and Mkrtchyan F.A. Expert systems of ecoinformatics // Reports of the Moscow A. S. Popov Scientific-Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications. Series "Ecoinformatics Problems", Issue XII. Moscow. 2016. P. 84-88.
24. Nitu C., Krapivin V.F., and Pruteanu E. Ecoinformatics: Intelligent Systems in Ecology. - Bucharest, Rumania: Magic Print. 2004. 411 pp.
25. Nitu C., Krapivin V.F., and Soldatov V.Yu. Information-modeling technology for environmental investigations. Matrix Rom, Bucharest, Romania, 2013, 621 pp.
26. Soldatov V.Yu. Detection of tropical cyclones in their earlier stage // Proceedings of the XXI International Symposium "Ecoinformatics Problems" (with the School-Seminar for Young Scientists). 2-4 December 2014, Moscow. - Moscow: The Russian Sciences Engineering A.S. Popov Society for Radio, Electronics and Communication. 2014. P. 18-23.
27. Soldatov V.Yu. Remote sensing monitoring of the atmosphere-ocean system as generator of tropical cyclones // Proceedings of the 30th International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice. 15-19 February 2015. Mombetsu, Hokkaido, Japan. - Mombetsu, Hokkaido, Japan: The Okhotsk Sea & Cold Ocean Research Association. 2015. P. 199-202.
28. Soldatov V.Yu., Nitu C., and Krapivin V.F. Diagnosis of transition processes in the ocean-atmosphere system // Control Engineering and Applied Informatics. 2010. V. 12. No. 2. P.22-29.
29. Soldatov V.Yu., Nitu C., and Krapivin V.F. Information-modeling technology for the operative diagnostics of the ocean-atmosphere system // The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, Valahia University of Targoviste, Romania. 2011. V. 16. No. 2. P. 82-90.
30. Tarko A.M. Analysis of Global and Regional Changes in Biogeochemical Carbon Cycle: A Spatially Distributed Model. - Laxenburg, Austria: Interim Report. IR-03-041. IIASA. 2003. 28 pp.
31. UNESCO (2015) Water for a sustainable world. The United Nations World Water Development Report 2015. UNESCO, Geneva, 2015. 125 pp.