

# ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 502/504 : 001

## АНАЛИЗ РОЛИ НАЗЕМНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

Канд. техн. наук **И.И. Потапов**

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

## ANALYSIS OF THE LAND VEGETATION IN CLIMATE CHANGE

**I.I. Potapov**

*Ключевые слова: природа, общество, наземная растительность, лесная экосистема, мониторинг, вода, климат, углекислый газ.*

*Keywords: nature, society, terrestrial vegetation, forest ecosystem, monitoring, water, climate, carbon dioxide.*

*Проанализирована роль наземной растительности в изменении климата. Отмечена особая роль лесных экосистем. Отмечена сложность задачи диагностики системы природа-общество в связи с ее интерактивностью и наличием плохо оцениваемых обратных связей. Приведена классификация наземных экосистем и указаны их характеристики. Перечислены наиболее существенные типы воздействий человека на природную среду. Обсуждены показатели изменчивости отдельных типов экосистем. Отмечены связи между наземной растительностью и изменением климата. Указаны наиболее важные для обеспечения жизни факторы окружающей среды. Обращено внимание на обеспечение населения водными ресурсами.*

*A role of the terrestrial vegetation is analyzed in the connection of the climate change. Special function of the forest ecosystems is marked. The task complexity connected with diagnostics of the nature-society system is noted depending on the interactivity and existence of the feedbacks that are not correctly assessed. A classification of the terrestrial ecosystems is given and their characteristics are shown. The most important human impacts on the environment are enumerated. The changeability indicators of separate types of the ecosystems are discussed. Correlations between the terrestrial vegetation and climate change are noted. The most important environmental factors are shown to be as living supporting components. It is pay attention on the providing the water resources for the people.*

## Введение

Знание состояния наземных экосистем и особенно лесных экосистем в современное время оказывается одним из приоритетных направлений при изучении глобальных изменений, включая изменение климата, регулирование парникового эффекта, производство продовольствия и древесины [5]. Многообразие взаимоотношений человеческого общества и территорий, покрытых лесом, затрудняет достоверную прогнозную оценку последствий для человечества происходящих антропогенных изменений этих территорий. Совершенно очевидно, что натурный эксперимент с лесами пора заканчивать и переходить к компьютерным модельным экспериментам. Именно только с помощью моделей возможна безопасная стратегия выработки управленческих решений в области лесоведения. Поэтому остановимся в основном на рассмотрении роли лесных экосистем.

Современная популяционная биология создала научную базу для развития математических моделей лесных экосистем. Её основой является рассмотрение леса как биосистемы определенного ранга, характеризуемой набором её признаков. Одним из таких признаков служит показатель генетической структуры лесного биогеоценоза. Обычно в моделях лесных экосистем, учитывающих их пространственную неоднородность, вводятся ограничения на видовое разнообразие в структуре дискретных пикселей пространства. Как правило, считается, что в каждом пикселе находятся особи одного вида, а характеристики окружающей среды пикселя однородны. При этом учитывается возрастная дифференциация деревьев между пикселями, что согласуется с пространственными разрешениями спутниковых систем мониторинга. Разработка моделей лесных экосистем для решения проблем лесного хозяйства требует огромного количества различных данных. Применение ГИМС-технологии [9] позволяет здесь решить главную задачу снижения требований к информационному обеспечению систем мониторинга и осуществить синтез эффективных моделей на базе простых моделей отдельных частных процессов функционирования лесов. Достаточно подробный анализ уже созданных моделей лесных экосистем сделан в [2], где впервые разработана концепция построения биоэкологических моделей многовидовых разновозрастных лесных насаждений, включающая следующие основные положения:

- основные биоэкологические параметры видов изменяются в течение онтогенеза, соответственно в моделях они заданы (в виде справочных баз) для каждого возрастного (онтогенетического) состояния всех моделируемых видов;
- доступная фотосинтетически активная радиация (ФАР) является основным системообразующим фактором формирования и развития лесных экосистем в пределах территорий с умеренным климатом;
- темпы роста деревьев и насаждений зависят от взаимного положения особей и их групп в пространстве, особенностей светового режима, доступности влаги и элементов минерального питания;
- гибель особи (группы особей) наступает в результате естественного старения; дефицита ресурса, ниже предельно допустимых значений; длительного недополучения ресурса; экзогенных, в том числе и антропогенных воздействий;
- число особей каждого вида, появляющихся в результате естественного возобновления, зависит от доступного количества семян, условий развития проростков, а также способности к порослевому возобновлению;
- пространственная структура отдельных деревьев и их групп может быть представлена в виде набора прямоугольных параллелепипедов.

Лесная экологическая система является важной составляющей глобального континуума почвенно-растительных формаций Земного шара. Поэтому создание моделей, которые бы описывали динамику леса, является принципиальным этапом синтеза глобальной модели. Конечно, значение моделей лесных экосистем является более широким, так как лесные ресурсы и их использование влияют на экономические потенциалы регионов.

Многообразие типов лесных экосистем, функционирующих в столь же многообразных условиях внешней среды, заставляет исследователей искать пути согласования этих многообразий. Hasenauer [3] обсудил технологию моделирования лесных экосистем, выделив три главных направления:

- модели роста и продуктивности,
- модели сукцессии, и
- биогеохимически-механистические модели.

При выборе типа модели из этого ряда или создания комбинированной модели необходимо ориентироваться на соотношение временных и пространственных масштабов, учитывая цель моделирования и информационные возможности. Схематически это отражено на рис. 1

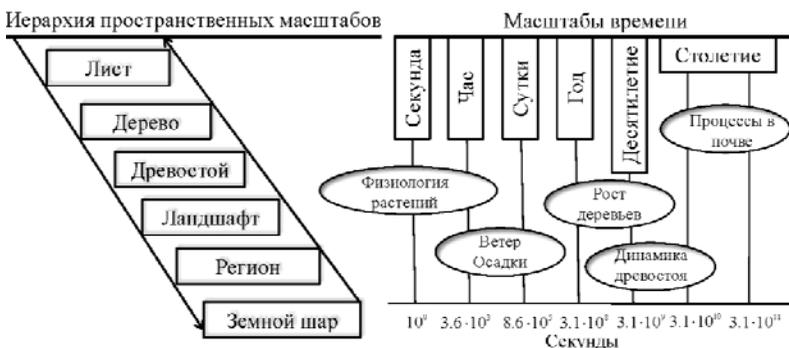


Рис. 1. Схема согласования пространственных и временных шкал при моделировании лесной экосистемы.

### Экосистемы суши и их глобальная динамика

Продолжающееся увеличение численности населения земного шара и связанное с этим усиливающееся давление хозяйственной деятельности человека на окружающую среду и экосистемы становится не только главной угрозой для дальнейшего устойчивого развития цивилизации в контексте глобальной экологической безопасности, но также отображают опасное нарушение нормального функционирования различных систем жизнеобеспечения. В связи с ключевой ролью, которую играют экосистемы в процессах природно-обусловленного регулирования свойств окружающей среды, принципиально важное значение приобретает анализ имеющихся данных о глобальной динамике экосистем и оценке вероятных трендов. Важную информацию по этой проблематике можно найти, в частности, в недавних публикациях многих авторов [4,8,10]. В них справедливо отмечена тесная взаимосвязанность глобальных экосистем и населяющих планету людей, составляющих единый и чрезвычайно чувствительный к внешним воздействиям симбиоз. Такого рода представления были детально обоснованы в работе [9] в форме концепции биотической регуляции окружающей среды, а монографии

[8] содержат анализ ключевых аспектов глобальных изменений с точки зрения функционирования глобальных систем жизнеобеспечения и требований к адекватному экомониторингу.

Глобальные природные и регулируемые экосистемы играют важную роль как фактор динамики окружающей среды в диапазоне от микромасштабов (это относится, например, к почвенным бактериям) до всей планеты (в данном случае особое место занимает проблема замкнутости глобальных биогеохимических круговоротов) и, с другой стороны, - служат жизненно важным источником питьевой воды, пищи, древесины, бумаги и других средств жизнеобеспечения. Как уже неоднократно отмечалось ранее, острота проблемы состоит в том, что мир в целом уже приблизился к таким пределам воздействий на экосистемы, превышение которых чревато необратимым разрушением глобальных систем жизнеобеспечения, а по некоторым показателям подобные пределы были уже превзойдены, хотя (заметьте сразу) проявляющееся в настоящее время увлечение апокалиптически-прогнозами пока что лишено оснований (это особенно относится к так называемому «глобальному потеплению»).

Чрезвычайная сложность обсуждаемой проблемы связана с тем, что необходимо объяснить (и, по возможности, предсказать) динамику интерактивной системы «природа-общество» (общество должно быть поставлено при этом на передний план, поскольку именно его функционирование определяет воздействия на природу) с ее многочисленными обратными связями, нелинейностями и «сюрпризами». К сожалению, современный этап изучения системы «природа-общество» можно оценить не более, чем начальный и предварительный. Это относится даже к простому описанию современного состояния природы (глобальных экосистем), которое серьезно осложняет дефицит данных наблюдений при кажущемся обилии средств наблюдений (особенно дорогостоящих спутниковых). Именно поэтому многочисленные классификации земной поверхности, как правило, являются во многих отношениях неполными, будучи в большинстве случаев сконцентрированными лишь на рассмотрении пяти типов экосистем (в скобках указана доля поверхности суши, за исключением Антарктики и Гренландии, занимаемая соответствующей экосистемой): агроэкосистем (28%), прибрежных регионов (22% при полосе шириной 100 км), лесов (22%), пресноводных (<1%) и травяных (41%) экосистем. В [9] показана наиболее развитая и исследованная классификация почвенно-растительных покровов. Табл. 1 характеризует имеющиеся данные о классификации растительных покровов с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ . Исключение Мирового океана со всеми его экосистемами является, конечно, серьезным, хотя и оправданным (ввиду дефицита информации) пробелом. Специального внимания заслуживают и экосистемы почв.

Упомянутые выше экосистемы играют очень важную роль в решении разнообразных задач жизнеобеспечения людей и регулирования состояния окружающей среды (табл. 2).

### **Характеристика антропогенных воздействий на экосистемы**

Авторы отчета Института мировых ресурсов [1] составили краткую, но весьма содержательную сводку антропогенных воздействий на экосистемы за период развития цивилизации, начиная с интенсивного применения оросительных систем во времена шумерской цивилизации, которое привело к засолению почв, до современных глобальных процессов загрязнения атмосферы и разрушения слоя озона. Данные табл. 3 характеризуют наиболее важные аспекты антропогенных воздействий на экосистемы в настоящее время.

Таблица 1

### Классификация земных покровов и их параметры.

Биом	Количество биомов с разрешением 1°×1°	Площадь (10 <sup>6</sup> км <sup>2</sup> )
<i>Высокая растительность</i>		
Широколиственные вечнозеленые деревья	1433	17,2
Широколиственные листопадные деревья	258	2,2
Широколиственные и хвойные деревья	487	3,9
Хвойные вечнозеленые деревья	2156	14,8
Хвойные сезонные деревья	1117	6,1
<i>Невысокая растительность</i>		
Луга С <sub>4</sub>	4316	46,4
Кустарники на голой почве	911	9,4
Карликовые деревья и кустарники	1252	5,9
Сельскохозяйственные растения и луга С <sub>3</sub>	2583	26,2
<i>Вся растительность</i>	22 097	147,8

Таблица 2

### Экосистемы и их функции жизнеобеспечения.

Экосистемы	Жизнеобеспечение людей	Регулирование состояния окружающей среды и жизнедеятельности людей
Агро-экосистемы	Пища (с/х культуры), волокно (с/х культуры), генетическое разнообразие с/х культур	Поддержание функционирования водосборов (инфильтрация, регулирование стоков, частичная защита почв). Обеспечение местообитаний для птиц, процессов опыления, функционирования почвенных организмов. Образование почвенной органики. Запасание углерода, поступающего из атмосферы. Обеспечение занятости населения.
Прибрежные экосистемы	Рыба и моллюски. Рыба как пища для животных. Водоросли (как пища и сырье для промышленности). Соль. Генетические ресурсы.	Некоторое воздействие на штормы (мангровые заросли, «барьерные» острова). Местообитания для дикой фауны и флоры. Поддержание биоразнообразия. Растворение и переработка отходов. Обеспечение гаваней и маршрутов для водного транспорта. Местообитания для человека. Обеспечение занятости населения. Обеспечение мест отдыха и эстетического удовлетворения.
Лесные экосистемы	Древесина. Древесное топливо. Вода для питья и орошения. Фураж. Недревесные продукты (вино, бамбук, листья и т.п.). Пища (мед, грибы, фрукты и др.). Генетические ресурсы.	Удаление загрязнений атмосферы и выделение кислорода. Круговороты биогенов. Поддержание функционирования водосборов (инфильтрация, очищение вод, регулирование стока, стабилизация свойств почв). Поддержание биоразнообразия. Запасание углерода, поступающего из атмосферы. Некоторое ослабление экстремальных воздействий погоды. Образование почвы. Обеспечение занятости населения. Обеспечение местообитаний человека и диких животных. Обеспечение мест отдыха и эстетического удовлетворения.

Пресноводные экосистемы	Вода для питья и орошения. Рыба. Гидроэлектростанция. Генетические ресурсы.	Регулирование водного режима. Растворения и удаление отходов. Круговороты биогенов. Поддержание биоразнообразия. Обеспечение водной среды обитания. Обеспечение водных транспортных коридоров. Обеспечение занятости населения. Обеспечение мест отдыха и эстетического удовлетворения.
Травяные экосистемы	Домашний скот. Вода для питья и орошения. Генетические ресурсы.	Поддержание функционирования водосборов (инфильтрация, очищение вод, регулирование стоков, стабилизация свойств почв). Круговороты биогенов. Удаление загрязнений атмосферы и образование кислорода. Поддержание биоразнообразия. Образование почв. Запасание углерода, поступающего из атмосферы. Обеспечение местообитаний для человека и животных. Обеспечение занятости. Обеспечение мест отдыха и эстетического удовлетворения.

Таблица 3

**Антропогенные воздействия на экосистемы**

Экосистемы	Антропогенные воздействия	Причины воздействий
Агро-экосистемы	Использование сельскохозяйственных земель для городской застройки или промышленных целей. Загрязнение внутренних вод за счет стока биогенов и заиления. Обеднение водных ресурсов в результате ирригации. Снижение плодородия почв вследствие эрозии, изменения с/х практики или уменьшения поступления биогенов. Изменения погоды.	Рост численности населения. Возрастающие потребности в пище и продуктах промышленного производства. Урбанизация. Правительственная политика субсидирования сельского хозяйства. Бедность и безработица. Изменения климата.
Прибрежные экосистемы	Хищническая эксплуатация рыбных ресурсов (превышение допустимых уровней уловов). Трансформация ветландов и прибрежных местообитаний. Загрязнение вод сельскохозяйственными и промышленными источниками. Фрагментация или разрушение природных барьеров от приливов и рифов. Вторжения чуждых видов. Возможный подъем уровня моря.	Рост численности населения. Возрастающие потребности в пище и рост туризма. Развитие урбанизации и мест отдыха. Правительственные субсидии рыболовству. Неадекватная информация о состоянии экосистем, особенно с точки зрения условий для рыболовства. Бедность и безработица. Нескоординированная экологическая политика в прибрежных регионах. Изменения климата.
Лесные экосистемы	Трансформация или фрагментация лесных экосистем в результате с/х использования или урбанизации. Потери биоразнообразия в результате пожаров и обезлесивания, выбросы запасенного углерода, загрязнения атмосферы и водных бассейнов. Кислотные осадки, обусловленные промышленными загрязнениями. Вторжения чуждых видов. Переэксплуатация водных ресурсов в целях их хозяйственного использования.	Рост численности населения. Возрастающие потребности в древесине. Правительственные субсидии, связанные с рубкой лесов и использованием древесины. Неадекватная оценка потерь, обусловленных промышленными загрязнениями атмосферы. Бедность и безработица.

Пресно-водные экосистемы	Переэксплуатация источников воды в интересах хозяйственного использования. Нарушение норм вылова рыбы во внутренних водных бассейнах. Построение плотин в интересах орошения, создания гидроэлектростанций и регулирования наводнений. Загрязнение водных бассейнов за счет различных факторов хозяйственного водопользования. Вторжение чуждых видов.	Рост численности населения. Повсеместный дефицит воды и природно обусловленное неравномерное распределение водных ресурсов. Правительственные субсидии для поддержки водопотребления. Неадекватная оценка потерь, обусловленных загрязнением водных бассейнов. Бедность и безработица. Рост потребностей в гидроэнергетике.
Травяные экосистемы	Трансформация или фрагментация в результате с/х использования или урбанизации. Потери биоразнообразия в результате пожаров, выбросы запасенного углерода и загрязнение атмосферы. Потеря плодородия почв и загрязнение вод, обусловленные домашними животными. Неприемлемые масштабы использования животных для развлечений.	Рост численности населения. Возрастающие потребности в продуктах сельского хозяйства, особенно в мясе. Неадекватная информация о состоянии экосистем. Бедность и безработица. Доступность и легкость трансформации травяных экосистем.

Примеры разрушительных (и даже катастрофических) воздействий на экосистемы и их экономических последствий многочисленны. Ограничимся, в целях иллюстрации, лишь некоторыми из них. Произошедший в начале 1990 гг. коллапс уловов трески в морских регионах Канады оставил без работы около 30 тыс. рыбаков и только в регионе Ньюфаундленда породил серьезные экономические трудности для 700 поселений. Следствием дефицита питьевой воды в Китае, осложненного загрязнением речных и подпочвенных вод, оказались материальные потери, достигшие 11,2 млрд. долл./год. Коммерческие вырубки лесов и их трансформация в с/х земли в Индии не только изменили традиционный образ жизни населения, но вызвали дефицит древесного топлива и строительных материалов, затронувший интересы 275 млн. сельских жителей.

Что касается оценок последствий антропогенных воздействий в глобальных масштабах, то характерным примером является ситуация с водными ресурсами: около 28 % населения земного шара не имеет доступа к чистой питьевой воде; ежегодно из-за низкого качества питьевой воды и антисанитарии погибает около 5 млн. чел.; примерно 90 % отходов в развивающихся странах поступают в реки, озера и прибрежные регионы морей и т.д. Усиливающиеся выбросы углекислого газа в атмосферу обусловили значительные изменения глобального круговорота углерода.

Самый важный факт состоит в том, что уровни воздействия на экосистемы достигли поистине глобальных масштабов. Около 75 % морских популяций рыб либо сократились в результате нарушения допустимых уровней уловов, либо оказались в состоянии, близком к порогу их выживания. Интенсивные вырубки лесов привели к сокращению их площади примерно вдвое, а создание различных хозяйственных инфраструктур вызвало фрагментацию лесного покрова. Примерно 58 % коралловых рифов испытывают опасные воздействия, связанные с рыбо-

ловством, туризмом и загрязнениями. Для 65 % пахотных земель типична частичная потеря плодородия. Масштабы хозяйственного использования грунтовых вод превосходят скорость их естественного обновления, по крайней мере, на 160 млрд. м<sup>3</sup>/год. В большинстве случаев происходило усиление антропогенной нагрузки на экосистемы.

Как хорошо известно, главными причинами деградации экосистем являются рост численности населения и, соответственно, - потребностей в природных ресурсах, а также нагрузки на окружающую среду (табл. 2). Характеризующие современную глобальную ситуацию конкретные детальные данные можно найти в публикациях многих авторов. Отметим лишь, что исключительно важной особенностью возрастающих масштабов потребления является их сильнейшая географическая неоднородность, отображающая существующие в мире социально-экономические контрасты.

### **Современное состояние отдельных экосистем и тренды их изменчивости**

Обсудим в этой связи основные результаты, полученные в рамках Пилотного анализа глобальных экосистем (PAGES). Основные трудности подобного анализа связаны с дефицитом имеющейся информации. Главное внимание проекта PAGES было сосредоточено на рассмотрении трех типов индикаторов воздействий на динамику экосистем:

(1) антропогенные нагрузки (рост численности населения, возрастающий уровень потребления ресурсов, загрязнения, переэксплуатация природных и регулируемых экосистем);

(2) пространственная протяженность экосистем (размеры, очертания, локализация, географическое распределение);

(3) производство таких экономически важных продуктов как сельскохозяйственные культуры, древесина, рыба и др.

Существенный дефект каждого из этих индикаторов в отдельности и всей их совокупности состоит в том, что они не содержат информации о порогах способности экосистем выполнять их функции жизнеобеспечения и преодолевать физическую неустойчивость окружающей среды. Ведь важным моментом оценки уровня сохранения эволюционно выработанного распределения валовой первичной продукции биосферы является знание устойчивого соотношения между ее потреблением по всем видам сообщества, имея в виду животных и человека. Но человек изменяет это распределение как правило без учета этой устойчивости. В результате биотическая регуляция окружающей среды нарушается, а потоки вещества и энергии перераспределяются не наилучшим образом, приводя к усилению дефицитов жизненно важных элементов во многих регионах.

Результаты экспертных оценок свидетельствуют, в целом, о значительных антропогенных воздействиях на экосистемы (особенно за XX-й век), которые привели к существенным изменениям их способности выполнять функции жизнеобеспечения. Хотя в некоторых случаях (это касается, например, производства пищи) производительная способность экосистем значительно возросла, обеспечив необходимый уровень производства, в других случаях (качество питьевой воды, сохранение биоразнообразия и др.) имела место деградация функционирования экосистем. Рассмотрим эти результаты подробнее.

*Производство пищи.* Состояние современных агроэкосистем, обеспечивающих 95% протеина за счет культивируемых растений и животных и 99% калорий по-

требляемой человеком пищи, является противоречивым. С одной стороны, урожаи с/х культур возрастают, но, с другой стороны, - в большинстве стран мира происходит деградация качества агроэкосистем. Так, например, на 65% земель сельскохозяйственного назначения зарегистрировано снижение уровня природного плодородия почв. Несмотря на это, широкое применение удобрений, ирригации и различных новых технологий (семена, пестициды и т. п.) более чем компенсировало влияние ухудшения состояния агроэкосистем, и эта тенденция сохранится, по-видимому, в обозримом будущем (остается неясным, однако, как долго). Особую озабоченность вызывает нарушение глобального круговорота азота, зависящего от темпов производства пищи. Избыточное количество азота, вносимого в почву в процессе с/х производства пищи приводит к искажению его природного круговорота, следствием которого являются разрушение озонового слоя и эвтрофикация водоемов.

Значительно более проблематична ситуация с выловом рыбы. Современное состояние прибрежных морских экосистем не более, чем удовлетворительное, и продолжает ухудшаться. На 28% площадей акваторий наиболее существенных регионов рыболовства запасы рыбы сократились, ввиду перевыловов, или только начинают восстанавливаться. На 47% акваторий уровни выловов близки к предельно допустимым биологическим пределам. К сожалению, информация о потенциальных запасах биомассы в океане противоречива. Более или менее изучены общие закономерности распределения органической жизни в водной толще Мирового океана и морей. Известно, что развитие фитопланктона, как первоисточника продуктивности других трофических уровней океана, ограничивается в основном верхним стометровым слоем. При этом 65% массы зоопланктона и свыше 90% нектона размещаются в слое до глубин в 500 м. Бентосные животные обитают главным образом на глубинах до 200 м. (около 80%). По продуктивности Мировой океан сильно неоднороден. Менее 25% его площади занято экосистемами с биомассой планктона свыше 200 мг/м<sup>3</sup>. А более 50% площади занимают малопродуктивные экосистемы (менее 50 мг/м<sup>3</sup>).

Ситуация в пресноводных водоемах довольно противоречива. С одной стороны, имеет место переэксплуатация имеющихся природных ресурсов рыбы, но, с другой стороны, - в ряде случаев достигнуты положительные результаты путем искусственного рыбозаведения. Неуклонно возрастают масштабы рыбозаведения в прудах. В целом, возрастающая зависимость выловов рыбы от аквакультурного производства и спад природных рыбных запасов создают определенные угрозы для населения развивающихся стран, где аквакультурное производство отсутствует.

*Количество воды.* Водные ресурсы Земли (их запас оценивается величиной 1386 млн. км<sup>3</sup>) играют критическую роль не только в изменчивости климата, но и в значительной степени в жизни населения планеты. Вода, покрывающая 75% поверхности Земли, циркулирует между океанами, сушей и атмосферой через испарение, осадки и сток. При этом более 97,5% воды находится в Мировом океане. Пресная вода составляет менее 2,5% этих запасов (в том числе озера и реки - 0,009%, грунтовые воды - 0,28%, атмосфера - 0,04%). Всего пресной воды на земном шаре 35030000 км<sup>3</sup>. При этом почти 75% пресной воды находится в замёрзшем состоянии (ледники и полярные шапки). Запасы пресной воды по земному шару распределены неравномерно. Например, более 60% пресных озёр находится в Канаде. Одно из самых больших озёр мира о. Байкал (средняя глубина 758 м., наибольшая глубина 1637 м., объём 23 тысячи кубических км., площадь

31722 кв. км. без островов). Доступным для использования человеком является менее 1% всей пресной воды. Потребление воды в различных регионах неоднородно. Так, например, отношение объемов потребления воды на одного человека в Северной и Центральной Америке к уровню потребления в Европе составляет 1,45, в то время как этот показатель для Африки равен 0,19.

Водные ресурсы биосферы достаточно детально систематизированы по запасам и качеству [5]. Оценены основные потоки воды между океанами и сушей, установлены объемы речных, озерных, грунтовых и почвенных вод. В общем, резервы пресной воды на Земном шаре невелики. В течение года все реки выносят в Мировой океан около 50 тыс. куб. м. воды, что только в полтора раза больше объема вод о. Байкал или Великих Американских озер. По континентам запасы воды распределены неравномерно и непропорционально плотности населения.

Построение плотин и другие формы регулирования речного стока значительно изменили условия использования водных ресурсов, как для людей, так и для водных экосистем. Уровень хозяйственного использования речных вод достиг, в среднем, примерно половины от имеющихся ресурсов (при сильной контрастности этой ситуации в различных странах). Создание плотин и других инженерных сооружений привело к значительной фрагментации примерно 60% крупнейших в мире речных систем. В результате, например, утроилось (в среднем) время достижения речными водами соответствующих морей. Значительные изменения режима внутренних вод произошли под воздействием обезлесивания и осушения ветландов. Это особенно проявилось в тропиках, где леса являются ключевым фактором динамики водного режима. Глобальная площадь пресноводных ветландов сократилась примерно на половину, что сказалось на водозапасах и режиме наводнений.

Главные причины продолжающегося ухудшения качества природных вод – химические загрязнения водных бассейнов и поступление биогенов, а также (косвенно)– ослабление способности экосистем осуществлять фильтрацию вод и усиление эрозии почв под воздействием процессов землепользования [11]. Загрязнение биогенами в результате стока речных вод, загрязненных удобрениями, составляет серьезную проблему для сельскохозяйственных регионов во всем мире. Следствием этого вида загрязнений является эвтрофирование вод в озерах и прибрежных регионах морей (такого рода процесс особенно сильно проявляется в Средиземном и Черном морях, а также в северо-западной части Мексиканского залива и во многих крупных озерах). За последние два десятилетия произошло обусловленное поступлением биогенов значительное увеличение частоты опасного цветения водных бассейнов. Во многих случаях была нарушена способность пресноводных и морских прибрежных экосистем поддерживать необходимое качество природных вод. Хотя в промышленно развитых странах, в целом, было обеспечено некоторое повышение качества природных внутренних вод, ситуация в развивающихся странах развивалась в противоположном направлении, особенно вблизи от крупных городов и в промышленных регионах. Ухудшающееся качество воды болезненно сказывается в первую очередь на бедном населении, не имеющем доступа к чистой питьевой воде.

*Круговорот углерода.* Избегая повторений, напомним лишь, что растения и почвенные микроорганизмы обуславливают удаление углекислого газа из атмосферы и запасание его в их тканях, что способствует замедлению антропогенно обусловленного роста концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Важно подчеркнуть в этом контексте, что усиление эксплуатации экосистем как источников пищи и других

средств жизнеобеспечения оказывает негативное воздействие на способность аккумуляции углерода экосистемами. Это происходит, в особенности, при замене лесов агроэкосистемами (или даже вторичными лесами), обладающими более слабым потенциалом накопления углерода. Подобное землепользование порождает возникновение значительного источника выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу, вклад которого составляет до 20% по сравнению с суммарными антропогенными выбросами  $\text{CO}_2$ .

Несмотря на отмеченные обстоятельства, экосистемы все еще сохраняют свою роль значительного резервуара углерода, играющего важную роль в формировании его глобального круговорота. При этом главным резервуаром углерода на суше являются тропические и бореальные регионы, где углерод аккумулируется, соответственно, в растительном покрове и в почвах (особенно в торфяниках). В настоящее время 38-39 % углерода сосредоточено в лесах и 38% - в травяных экосистемах. На долю агроэкосистем приходится 26-28% углерода.

Слежение за динамикой биогеохимических круговоротов углерода и азота, а также круговорота воды имеет важнейшее значение для понимания условий существования экосистем. Эти круговороты являются главными индикаторами метаболизма биосферы и определяют функционирование глобальных экосистем. Ключевую роль играет уровень антропогенных воздействий на упомянутые круговороты.

За период с 1850 г. по 1998 г. концентрация  $\text{CO}_2$  в атмосфере повысилась с  $285 \text{ млн}^{-1}$  до  $366 \text{ млн}^{-1}$ , т.е. примерно на 30%. Это произошло главным образом в результате сжигания ископаемых топлив, но значительный вклад внесли и изменения землепользования, приведшие к выбросу углерода в атмосферу растительным покровом и почвами. Около 33 % углерода, аккумулированного в атмосфере за последние 150 лет, возникло за счет обезлесивания и изменений землепользования. Процесс выбросов в атмосферу углекислого газа и других парниковых газов, обусловленный динамикой биосферы, является интерактивным по отношению к изменениям климата, порожденным ростом концентрации  $\text{CO}_2$ . Так, например, потепление климата в Арктике чревато ускорением разложения гигантских массивов торфа в экосистемах тундры и тайги (таяние вечной мерзлоты должно сопровождаться мощными выбросами в атмосферу такого существенного парникового газа как метан). Важным аспектом проблемы повышения концентрации  $\text{CO}_2$  является эффект «фертилизации» - стимулирования роста некоторых видов растительности в условиях повышения концентрации  $\text{CO}_2$ . В частности, в средних и высоких широтах можно ожидать роста урожая зерновых культур на 5%, но в низких широтах (преимущественно в Африке) вероятен спад урожая до 10%.

Что касается глобального круговорота азота, то в этом случае влияние хозяйственной деятельности человека оказалось еще более существенным и биологически значимым. Для большинства видов природной растительности дефицит азота является главным фактором, ограничивающим ее развитие (это и является причиной применения азотных удобрений). Результатом расширяющейся практики использования удобрений, сжигания ископаемых топлив и обезлесивания явилось повышение количества азота, который могут использовать экосистемы, до уровня, значительно превосходящего природный. Это породило серьезные проблемы эвтрофирования (особенно для пресноводных и прибрежных экосистем), состоящее в том, что избыток азота стимулирует развитие «паразитических» во-

дорослей в такой степени, что возникает дефицит кислорода для различных водных организмов, включая популяции рыб.

*Круговорот воды.* Глобальный круговорот воды формируется и управляется следующими его элементами:

- *Накопление воды во льдах и снеге.* Ледники покрывают 10-11% поверхности суши. Почти 90% льдов сосредоточено в Антарктике, Гренландский ледяной щит содержит около 10% всех льдов. Эти ледовые щиты активно участвуют в глобальном круговороте воды. Например, ежегодно в среднем от Гренландского щита за счет таяния в Мировой океан поступает  $517 \text{ км}^3$  воды. В целом, ледовые щиты, ледники и устойчивый снежный покров содержат  $24\,064\,000 \text{ км}^3$  воды (1,7% всех запасов воды и 68,7% всех запасов пресной воды).

- *Осадки.* Осаждение воды из атмосферы реализуется через образование облаков в форме дождя, снега, крупы или града. Интенсивность осадков географически распределено неравномерно, колеблясь от 102-127 см/год в засушливых регионах США до 2300 см/год в Индии. В Южной Америке, Юго-Восточной Азии, Западной Африке и Океании имеются территории с интенсивностью осадков до 3000 см/год.

- *Таяние снега.* Снежный покров за счет задержки таяния в зависимости от температурного режима территории обеспечивает определенную стабилизацию ее водного баланса. Таяние снега поставляет воду в реки и резервуары. В зависимости от интенсивности таяния снега могут возникать чрезвычайные ситуации типа наводнения или затопления.

- *Инфильтрация.* Выпавшие осадки или растаявший снег поставляет воду в подземные резервуары. Интенсивность этого процесса зависит от качества почвенного и растительного покровов, а также от рельефа местности. Максимальная скорость просачивания воды в почву является функцией количества осадков и капиллярной проводимости почвы.

- *Освобождение грунтовых вод.* Грунтовые воды подпитывают реки, используются для хозяйственных нужд (питьевая вода, орошение и т.п.). В грунтовых водах сосредоточено 1,7% всех водных ресурсов и 30,1% пресной воды. Соотношение между солеными и пресными грунтовыми водами характеризуется показателями 54% и 46% соответственно.

- *Накопление грунтовых вод.* Запасы грунтовых вод формируются за счет процесса инфильтрации поверхностных вод (осадки, таяние снега, утечки из водоемов).

- *Накопление воды в океанах.* Океаны поставляет в глобальный круговорот воды около 90% испаренной на Земле влаги. Циркуляция воды в океанах, приливы и отливы обеспечивают выравнивание уровня солености по акваториям и способствуют регулированию температурного режима.

- *Испарение.* Испарение является одним из важных регуляторов глобального круговорота воды и ключевым процессом в энергетическом обмене земной поверхности с атмосферой. Количество испаряемой воды зависит от множества факторов внешней среды и может достигать, например, в пустынях до 1300-1699 мм/год.

- *Конденсация.* При наличии температурных градиентов атмосферная влага превращается в жидкую фазу, покрывая различные поверхности. С этим процессом связано формирование облаков, которые переносят воду в другие регионы, где она осаждается.

- *Накопление воды в атмосфере.* В атмосфере в виде облаков содержится 12900 км<sup>3</sup> воды.

- *Эвапотранспирация.* Испарение воды с поверхности, покрытой растительностью, формируется из двух процессов: непосредственного испарения и транспирации (дыхания) растений. Перенос влаги почвы растениями в атмосферу зависит от температуры воздуха, относительной влажности атмосферы, скорости ветра, влажности почвы и типа растений. В лесах транспирация составляет большую часть влагооборота. В целом растительный покров воздействует на аэродинамические условия в атмосфере и влияет на радиационный баланс на поверхности почвы.

- *Поверхностный сток.* Структура рельефа и состояние почвенно-растительного покрова в основном определяют интенсивность поверхностного стока осадков или талой воды в реки, озера и моря. Регулирующими здесь факторами являются как метеорологические параметры, так и многие антропогенные процессы, такие как, например, использование земель. Поверхностный сток возникает, когда объем осадков превышает инфильтрационную емкость почвы.

- *Речной сток.* Реки осуществляют частичное возвращение испарившейся с океанов влаги и выпавшей на суше в виде осадков обратно в океаны. Часть речной воды используется человеком в различных сферах своей деятельности. В целом в реках сосредоточено 2120 км<sup>3</sup> пресной воды.

- *Родники.* Выход грунтовых вод на поверхность Земли реализуется путем испарения и капиллярного подъема, а также через родники. Родники существуют даже на дне океанов. Интенсивность разгрузки грунтовых вод через родники зависит от множества факторов, среди которых уровень грунтовых вод, структура и плотность грунта, рельеф местности.

- *Накопление пресной воды.* Одной из важных составляющих глобального круговорота воды является пресная вода, от наличия которой зависит жизнь на Земле. Количество пресной воды формируется с участием всех элементов круговорота воды в природе, включая осадки, испарение, замерзание и сток.

- *Испарение с поверхности льда и снега.* Этот процесс перехода воды из твердого состояния в парообразное минуя процесс таяния необходимо учитывать при моделировании теплового баланса в системе *атмосфера-суша*.

Как уже отмечалось выше, к настоящему времени уровень антропогенных воздействий на водные системы стал очень значительным, что иллюстрирует, например, забор для хозяйственного (преимущественно сельскохозяйственного) использования примерно половины стока рек, который может достичь 70% к 2025 г. Перемещение пресной воды из рек и других резервуаров на сельскохозяйственные поля обеспечивает повышение урожаев, но при этом терпят серьезные ущерб разнообразные природные экосистемы, а также и водопользователи, находящиеся ниже по течению рек. Хотя часто воды возвращаются снова в реки, но оказывается при этом сильно загрязненными и, как правило, непригодными для последующего применения. Наиболее ярким примером таких процессов является изменение водного режима в бассейне Аральского моря.

Одной из острых проблем современной цивилизации является доступность пресной воды. Ведь вода является ключевым компонентом экосистем. Около одной трети мирового населения угрожает хронический дефицит воды уже в ближайшие несколько десятилетий. Это и другие обстоятельства определили

провозглашение Десятилетия пресной воды ООН (2005-2015 гг.). Следующие факты характеризуют современное состояние глобальных водных ресурсов:

- Общий объем водных ресурсов на Земле составляет примерно 1,4 млрд. км<sup>3</sup>.
- Объем пресноводных ресурсов равен примерно 35 млн. км<sup>3</sup>, или 2,5% от общего объема воды.

- Из этих пресноводных ресурсов около 24 млн. км<sup>3</sup>, или 68,9 %, существуют в виде льда и постоянного снежного покрова в горах, Антарктике и Арктике.

- Около 8 млн. км<sup>3</sup>, 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 105 000 км<sup>3</sup>, или 0,3 % мировых запасов пресной воды.

- Общий объем запасов пригодной к потреблению экосистемами и населением пресной воды составляет примерно 200 000 км<sup>3</sup>, 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.

- Годовой забор грунтовых вод оценивается в 600-700 км<sup>3</sup>, или около 20 % мирового забора воды. Около 1,5 млрд. человек используют для питья грунтовые воды.

- По оценкам в 2000 году на сельское хозяйство пришлось 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. Так, например, площадь пресноводных ветландов, играющих важную роль в природном очищении вод и в формировании круговорота воды, уменьшилась за последние 20 лет примерно вдвое. Между тем, согласно экономическим оценкам роли функционирования ветландов, их потери эквивалентны 20 тыс. долл./га год. Около 20% из 10 тыс. видов пресноводных рыб находятся на грани уничтожения или уже перестали существовать. Число крупных плотин в мире возросло с 5 тыс. в 1950 г. до более 45 тыс. в настоящее время, что сопровождается негативными экологическими последствиями.

Географическое распределение ресурсов пресной воды крайне неравномерно: около половины глобальных ресурсов приходится на долю шести стран (Бразилия, Россия, Канада, Индонезия, Китай, Колумбия), причем подобная неравно-

мерность 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, 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, возможности повышения которой весьма значительны. 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 обеспечение водой 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).

*Биоразнообразие.* Потери биоразнообразия за прошедшее столетие приняли угрожающие масштабы, причем подобные потери понесли практически все экосистемы (главным образом – в результате утраты районов жизнеобитания). Так, например, площадь лесов сократилась, по крайней мере, на 20%, а возможно (в глобальных масштабах) и до 50%. Некоторые лесные экосистемы (подобные сухим тропическим лесам Центральной Америки) исчезли вообще. Во многих странах утрачено до 50% мангровых плантаций, примерно вдвое сократилась площадь ветландов, в некоторых регионах размеры территорий, покрытых травой, уменьшились на 90%. Лишь тундровые, арктические и морские глубоководные системы остались относительно мало измененными, хотя и в этих случаях нередки проявления значительных антропогенных воздействий.

Даже в тех случаях, когда первоначальные ареалы экосистем сохранились, многим видам угрожают загрязнения, переэксплуатация, вторжения «чуждых» видов и деградация ареалов обитания. С точки зрения биоразнообразия наиболее пострадавшими являются пресноводные экосистемы. Были истреблены, например, около 20% видов пресноводных рыб, а многие другие виды находятся в угрожаемом состоянии. Лесные, травяные и прибрежные экосистемы сталкиваются с серьезными проблемами выживания. Примером усиливающейся опасности для биоразнообразия являются учащающиеся заболевания морских организмов, уси-

ливающееся цветение водоемов и значительное сокращение популяции амфибий. Помимо связанных с этим потерь для медицины (ввиду уменьшения объемов сырья для лекарств), генных банков и экотуризма, сокращение биоразнообразия означает также угрозу для продуктивности экосистем, их целостности и устойчивости к внешним воздействиям разного рода.

В заключение данного параграфа отметим следующее. Ясно, что в настоящее время существуют многочисленные признаки антропогенно обусловленной деградации экосистем и ослабления их способности функционировать как системы жизнеобеспечения и регулирования свойств окружающей среды. Обсужденные выше данные свидетельствуют о том, что все рассмотренные виды экосистем испытывают серьезные и возрастающие антропогенные нагрузки. Происходят интенсивные процессы трансформации природных экосистем под воздействием обезлесивания, загрязнений (в том числе – биогенами), строительства плотин, биологических вторжений «чуждых» организмов. Следствием антропогенных воздействий являются значительные трансформации глобальных биогеохимических круговоротов, от нормального функционирования которых зависит благополучие экосистем.

Пока что негативные тренды характеристик состояния глобальных экосистем видимым образом не угрожают достижению высоких уровней производства различных товаров и услуг. Производство пищи и волокон никогда не достигало столь высоких уровней, как в настоящее время, а сооружение плотин обеспечило беспрецедентное зарегулирование речного стока для обеспечения сельскохозяйственного водопотребления. Подобные успехи в создании материального богатства во многих случаях чреватые, однако, долгосрочной перспективой снижения продуктивности глобальных экосистем и ослабления регулирования ими качества окружающей среды. Применение таких новых технических средств и технологий как искусственные удобрения, усовершенствованные средства вылова рыбы и системы ирригации замаскировало спад биопродуктивности природных экосистем, обеспечив необходимый рост производства пищи и волокна. Если, однако, думать о долгосрочных перспективах (а именно в этом контексте определяется понятие устойчивого развития), то необходимо помнить об ослаблении функционирования природных систем жизнеобеспечения, которое проявляется, например, в форме опасного уменьшения биоразнообразия, снижения качества питьевой воды, усиления выбросов парниковых газов в атмосферу и многих других негативных явлений.

В свете Всемирного совещания на высшем уровне в Иоганнесбурге в 2002 г. по проблемам устойчивого развития («Рио+10») ключевое значение приобретает обоснование приоритетов в проблеме функционирования интерактивной системы «природа-общество», требующих главного внимания. Острота ситуации становится особенно очевидной, если учесть весьма ограниченный успех Второй Конференции ООН по окружающей среде и развитию (Рио-де-Жанейро, 1992 г.), последующей Специальной Сессии ООН «Рио+5» и полный провал шестилетней серии ежегодных конференций представителей государств, подписавших Рамочную Конвенцию ООН по проблеме изменений климата (РКИК), послужившей основой для подготовки Протокола Киото. Спекулятивные преувеличения (достигавшие иногда уровня апокалиптических глобальных прогнозов), характерные для концепции «глобального потепления» отвлекли внимание (и в значительной мере финансовые ресурсы) от действительно приоритетной проблемы благополучия глобальных экосистем в условиях возрастающей численности населения зем-

ного шара и усиливающегося антропогенного воздействия на природные системы жизнеобеспечения. В этой связи Kondratyev и др. [6] справедливо подчеркнули перспективность «экосистемного подхода», состоящего в том, что использование природных ресурсов должно опираться на учет способности нормального функционирования глобальных природных систем жизнеобеспечения.

Экосистемный подход характеризуется следующими главными особенностями:

1. Комплексность (системность) анализа взаимодействий в системе «общество-природа».

2. Не фрагментарный, а целостный анализ функционирования экосистем.

3. Учет всего пространственно-временного разнообразия процессов при неременном приоритете долгосрочных перспектив.

4. Детальное рассмотрение интерактивных процессов в системе природа-общество (СПО).

5. Обоснование и учет пределов нормального функционирования экосистем и, в этой связи, - допустимых антропогенных нагрузок.

Различия между традиционным и экосистемным подходами к использованию природных ресурсов на примере лесного хозяйства значительны. Разумеется, преимущества экосистемного подхода не вызывают сомнений. Проблема состоит, однако, в том, в какой степени условия социально-экономического развития той или иной страны допускают последовательное осуществление экосистемного подхода. Обсужденные выше негативные проявления динамики различных экосистем наглядно отображают большие (иногда пока что не преодолимые) трудности реализации экосистемного подхода. В этой связи участники проекта PAGE сформулировали следующие общие рекомендации:

- Стимулирование развития науки и средств наблюдений;
- Осознание и количественные оценки ценности функций, выполняемых экосистемами;
- Стимулирование широкого обсуждения целей, научных основ и практической значимости экосистемного подхода;
- Обеспечение участия всех необходимых специалистов в решении задач управления экосистемами.

Достижение научного понимания закономерностей функционирования экосистем и, тем более, - прогноза динамики экосистем находится пока что на первоначальном этапе развития. В значительной мере это определяется скудностью имеющейся комплексной информации об экосистемах и их функционировании. Так, например, проблема глобального круговорота углерода уже довольно давно привлекает серьезное внимание. И, тем не менее, до сих пор не сформулированы даже системные требования к таким комплексным данным наблюдений, которые позволили бы получить адекватную информацию о закономерностях круговорота углерода (разумеется, это требует совместного применения как обычных, так и спутниковых средств наблюдений).

В этой связи Генеральный секретарь ООН Кофи А. Аннан справедливо отметил: «Невозможно обосновать эффективную экологическую политику, если она не опирается на надежную научную информацию. Хотя во многих областях был достигнут значительный прогресс в получении данных наблюдений, в наших знаниях сохраняются большие пробелы. В особенности, до сих пор не было получено полной глобальной оценки состояния существующих на земном шаре главных экосистем. Откликом на эту потребность является планируемая оценка со-

стояния глобальных экосистем за тысячелетие (Millenium Ecosystems Assessment – MEA) как крупная международная инициатива с целью картирования «здоровья» нашей планеты. Эта инициатива поддержана многими правительствами, а также ЮНЕП, ЮНДП, ФАО и ЮНЕСКО. Я призываю государства-члены ООН помочь обеспечить необходимую финансовую поддержку оценке состояния экосистем за тысячелетие и стать активными участниками программы».

Осуществление программы MEA, которое должно было начаться в 2001 г., явится лишь первым шагом на пути оценки состояния глобальных экосистем, а также разработки и реализации таких мер, которые необходимы для сохранения экосистем на планете в таких условиях, когда происходит усиление потребностей в природных ресурсах и, с другой стороны, - обостряется проблема не просто сохранения качества окружающей среды, но нормального функционирования жизнеобеспечивающих систем Земли, без чего невозможно дальнейшее развитие цивилизации.

### **Роль лесных экосистем**

В последние годы проблема воздействия атмосферного углекислого газа на глобальный климат Земли обсуждается учеными и политиками. Одни считают, что человечество за счет усиления парникового эффекта неизбежно изменит климатическую обстановку на земном шаре, а вследствие этого поменяются условия жизни, возможно в худшую сторону. А потому необходимо ограничить промышленные выбросы CO<sub>2</sub>. Другие, соглашаясь с последствиями парникового эффекта, отрицают выдвинутую хорошо известным Протоколом Киото стратегию и полагают, что указанное ограничение (квоты) приведет к ухудшению экономики многих регионов земного шара, не решив проблему парникового эффекта и еще более обострив глобальную экологическую обстановку. Противники стратегии Киото считают, что предотвратить парниковый эффект можно только правильным управлением структурой земных покровов и введением жесткого контроля за загрязнением Мирового океана. В связи с этим Межправительственная Комиссия по изменению климата на 8-й Сессии 2-1 июня 1998 г. в Бонне и на 14й Сессии 1-3 октября 1998 г. в Вене подготовила специальный доклад о роли стратегии использования земных покровов (особенно лесов) в глобальном балансе CO<sub>2</sub>. Этот доклад обсуждает проблему взаимосвязи антропогенной активности в области реконструкции земных покровов с распределением CO<sub>2</sub> и других парниковых газов в биосфере. Оцениваются различные сценарии, вытекающие из Протокола Киото и касающиеся проблемы воздействия человеческого общества на структуру земных покровов вообще и на залесенность территорий, в частности. Здесь дается краткий анализ указанного доклада.

Статья 3.1 и Приложение 1 Протокола Киото предусматривают ограничение, а затем сокращение эмиссии парниковых газов в период 2008-2012 гг. До этого времени планируется решить цикл задач по оценке роли использования земной поверхности. В частности, сюда входят задачи формализованного описания процессов изменения структуры земных покровов, таких как облесение, лесонасаждение и обезлесивание, а также связанных с ними запасов углерода. Понимание метеорологических процессов как функций парниковых газов относится к одной из ключевых проблем человечества в первом десятилетии третьего тысячелетия. Только знание корреляций метеорологических явлений различного пространственно-временного масштаба с запасами CO<sub>2</sub> и других парниковых газов позволит

принять корректные и конструктивные решения в области охраны глобальной окружающей среды.

Динамика наземных экосистем зависит от взаимодействий между биогеохимическими циклами, которые в последнее десятилетие XX -го столетия подверглись антропогенной модификации. Особенно это касается циклов углерода, азота и воды. Наземные экосистемы, в которых углерод сохраняется в живой биомассе, разлагающемся органическом веществе и почве, играют важную роль в глобальном круговороте  $\text{CO}_2$ . Углерод обменивается между этими резервуарами и атмосферой через фотосинтез, дыхание, разложение и горение. Вмешательство человека в этот процесс происходит через изменение структуры земных покровов, загрязнение поверхности водных бассейнов и почвенных площадей, а также через непосредственную эмиссию  $\text{CO}_2$  в атмосферу.

Соотношение роли различных экосистем в формировании запасов углерода в резервуарах биосферы определяет скорость и направленность в изменениях региональных метеорологических ситуаций и глобальном климате. Точность оценки уровня этих изменений зависит от достоверности данных инвентаризации наземных экосистем. Об этом можно судить по данным о расхождении запасов углерода в растительности различных типов, что позволяет говорить о важности более точной классификации наземных экосистем.

Антропогенная составляющая глобального баланса углерода, начиная с середины XIX -го столетия, вносит нарастающую амплитуду воздействия практически на все его природные элементы. С 1850 г. по 1998 г. около  $270 \pm 60$  ГтС было выброшено в виде  $\text{CO}_2$  в атмосферу за счет сжигания топлив и производства цемента. Около  $136 \pm 55$  ГтС поступило в атмосферу в результате антропогенной реконструкции земных покровов. Это привело к возрастанию в атмосфере  $\text{CO}_2$  на  $176 \pm 10$  ГтС, т.е. парциальное давление углекислого газа в атмосфере возросло с 285 до  $366 \text{ млн}^{-1}$  (на 28%). Другими словами, за 148 лет 43% выброшенного углерода осталось в атмосфере и не было поглощено наземными или океанскими экосистемами ( $230 \pm 60$  ГтС было поглощено).

Некоторое представление о балансе углерода в глобальных масштабах дают данные табл. 4. Эта таблица показывает, что скорости и тренды накопления углерода в наземных экосистемах весьма неопределенны. Однако, все же видно, что наземные экосистемы являются важными поглотителями избыточного  $\text{CO}_2$ . Понять детали такого поглощения можно только при моделировании процесса роста растений, т.е. при учете влияния на фотосинтез растений биогенных элементов почвы и других биофизических факторов.

Таблица 4

### Характеристика среднегодового бюджета $\text{CO}_2$ .

Характеристика	Оценка, ГтС / год	
	1980-1989 гг.	1990-1998 гг.
(1) Эмиссия $\text{CO}_2$ за счет сжигания топлив и производства цемента	$5,5 \pm 0,5$	$6,3 \pm 0,6$
(2) Накопление $\text{CO}_2$ в атмосфере	$3,3 \pm 0,2$	$3,3 \pm 0,2$
(3) Поглощение океанами	$2,0 \pm 0,8$	$2,3 \pm 0,8$
(4) (1) - [(2) + (3)]	$0,2 \pm 1,0$	$0,7 \pm 1,0$
(5) Эмиссия $\text{CO}_2$ за счет использования земельных ресурсов	$1,7 \pm 0,8$	$1,6 \pm 0,8$
(4)+(5)	$1,9 \pm 1,3$	$2,3 \pm 1,3$

Наибольшее внимание детальному изучению следует уделять лесным экосистемам и связанными с ними процессами естественного облесения, восстановления и сведения лесов. Об этом говорят статьи 3.3 и 3.4 Протокола Киото, где указывается на необходимость определения национальных и международных стратегий управления лесами. Ведь объем резервуара для стока  $\text{CO}_2$  из атмосферы в лесном массиве является функцией плотности его полога, а во временном промежутке изменение этого объема определяется уровнем и характером динамических процессов перехода леса данного типа в другое состояние. Причем, причины этого перехода могут быть естественными, антропогенными и смешанными. Биоэкология пытается создать универсальную теорию таких переходов, но пока имеется только качественное описание наблюдаемых в действительности переходов. Как отмечается в Протоколе Киото, важным является правильное определение понятий облесения, восстановления лесов и обезлесивания. Под облесением понимают размещение леса на участке суши, который до этого был без леса в течение некоторого периода (20-50 лет и более) и был использован для других целей. Обычно этим термином определяют процесс естественной сукцессии за счет распространения леса на другие территории без вмешательства человека. Процесс восстановления лесов определяется как замена лесом другого типа наземных экосистем путем высадки деревьев. Обезлесивание - это замена территории леса другой экосистемой. Таким образом, в динамике лесной экосистемы возможны два противоположных процесса, управлять которыми может и природа и человек. Каждый из этих процессов имеет разветвления, характеризующиеся спецификой динамики растительного покрова данной территории. Особый статус приобретает процесс высадки деревьев на территории, где исторически их никогда не было. В этом случае происходит скачок значимости данной территории в динамике  $\text{CO}_2$ .

Табл. 5 иллюстрирует влияние процессов облесения /обезлесивания на запасы углерода при антропогенном сценарии ФАО [11], где под лесом понимается участок суши не менее 0,5 га с деревьями высотой более 5 м, крона которых занимает более 10% площади. Обезлесивание определяется как изменение земного покрова с сокращением площади кроны деревьев менее, чем до 10% площади, а также изменение класса леса с негативными последствиями (например, уменьшение продуктивности). Под облесением подразумевается искусственное размещение леса на территории, на которой ранее его никогда не было. Заметим, что «естественное расширение» (т.е. распространение леса на сельскохозяйственной территории без прямого его насаждения) также в сценарии ФАО относится к процессу облесения. Наконец, под восстановлением леса понимается прямое искусственное насаждение деревьев на территориях, где лес ранее был удален.

Технология рассмотрения сценариев не дает возможности найти тот сценарий, который можно рекомендовать для использования. Слишком упрощенный подход предложен в Протоколе Киото, чтобы можно было получить достоверные оценки динамики  $\text{CO}_2$  как функции многих природных и антропогенных параметров.

**Оценка рассчитанного изменения среднегодового запаса углерода для сценариев облесения/обезлесивания. Обозначения: *A* – обезлесивание, *B* – облесение, *RF*- изменение среднего запаса *C* при обезлесивании, тС / га; *AF*- Средняя скорость поглощения  $CO_2$  при облесении, тС/(га·год); *TR*- Изменение площади ( $10^6$ га/год) в результате перехода между отсутствием леса и лесом; *FR*-Прогноз изменения запасов углерода ( $10^6$  т С / год) в 2008-2012 гг. в рамках сценария ФАО.**

Регион	RF	AF	TR		FR	
			<i>A</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
Бореальный	35	0,4 - 1,2	0,5	0,1	-18	-185
Умеренный	60	1,5 - 4,5	2,1	1,9	-90	-501
Тропический	120	4 - 8	13,7	2,6	-1644	-1352

### Заключение

Данная работа нацелена на систематизацию современных данных и знаний о состоянии, динамике и распределении наземных экосистем с особым вниманием к лесным экосистемам в биосфере с учетом влияния на них природных и антропогенных факторов. В качестве конструктивного механизма для анализа этих данных и использования имеющихся знаний о лесных экосистемах рассматривается экоиформатика как новое научное направление, синтезирующее методики, алгоритмы и модели с современными техническими достижениями в области глобального мониторинга окружающей среды.

Затрагиваемые здесь проблемы охватывают широкий спектр теоретических и прикладных задач, решение которых неизбежно приводит к проблеме изменения глобального климата. Поиск причин этих изменений сводится к построению геоэкологической информационно-моделирующей системы (ГИМС), охватывающей наиболее значимые прямые и обратные связи в окружающей среде.

### Литература

1. A Guide to World Resources 2000-2001. People and Ecosystems: The Frying Web of Life. World Resources Institute, Washington, D.C., 2000. 389 pp.
2. Chumachenko S.I. Simulation modeling of multi-species different- ages forested plantings. Doctor Dissertation. M.: Moscow State University of Forest. 2006. 287 pp.
3. Hasenauer H. Sustainable forest management: Growth models for Europe. Berlin: Springer, 2006. 250 pp.
4. Gbondo-Tugbawa S.S., Driscoll C.T. Evaluation of the effect of future controls on sulfur dioxide and nitrogen oxide emissions on the acid-base status of a northern forest ecosystem // Atmospheric Environment, 2002. V. 36. Nr. 10. P. 1631-1643.
5. Gleick P.H., Wolff G.H., Cooley W. The World's Water 2006-2007. The Biennial Report on freshwater resources. Washington: Island Press, 2007. 392 pp.
6. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Natural Disasters as Interactive Components of Global Ecodynamics. - Springer/Praxis. Chichester, UK. – 2006. - 578 p.
7. Krapivin V.F., Potapov I.I., Soldatov V.Yu. Climate, nature, society. Berlin: Lap-Lambert Academic Publishing, 2017. 384 pp.

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

9. Krapivin V.F., Varotsos C.A., Soldatov V.Yu. New Ecoinformatics Tools in Environmental Science: Applications and Decision-making. Springer, London, U.K., 2015. 903 pp.

10. Seppelt R., Voinov A. Optimization methodology for land use pattern using spatially explicit landscape models // Ecological Modelling, 2002. V. 151. Nr. 2-3. P. 125-142.

11. Watson R.T., Noble I.R., Bolin B., Ravindranath N.H., Verardo D.J, Dokken D.J. Land use, land-use change, and forestry. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 377 pp.