

577.4
К 642

К. Я. Кондратьев

**ГЛОБАЛЬНАЯ
ЭКОЛОГИЯ
и требования
к данным
наблюдений**

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОСМИЧЕСКИМ ИССЛЕДОВАНИЯМ
ДЛЯ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

К. Я. Кондратьев

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ и требования к данным наблюдений



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
„НАУКА”
С.-ПЕТЕРБУРГСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1992

УДК 910.1

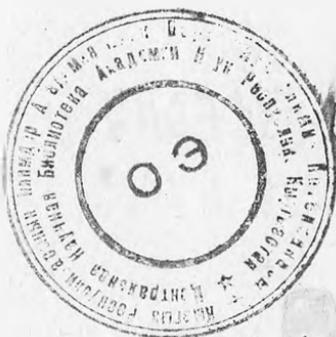
Кондратьев К. Я. Глобальная экология и требования к данным наблюдений. — СПб.: Наука, 1992. — 92 с.

В книге обсуждены ключевые проблемы глобальной экологии, связанные с нарушениями замкнутости глобальных биогеохимических круговоротов и перераспределением компонентов теплового баланса Земли. Проанализированы возможная эволюция биосферы и перспектива устойчивой экодинамики. Рассмотрены основные задачи Международной геосферно-биосферной программы и в этой связи — глобального экологического мониторинга. Кратко охарактеризованы основные направления разработок в рамках программы Международного года космоса.

Библиогр. 112 назв. Табл. 14.

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук В. В. Козодеров,
д-р геогр. наук В. Ф. Логинов



К 1903040000-533
042(02)-92 456-92, I полугодие

© К. Я. Кондратьев, 1992

ISBN 5-02-024695-6

1. ВВЕДЕНИЕ

В конце XX в. человечество вступило в такой период своего развития, когда обретает черты реальности предсказание великого русского естествоиспытателя В. И. Вернадского о том, что хозяйственная деятельность человека становится геологической силой, способной изменить мир, поставив его на грань глобальной экологической катастрофы. Именно это определяет исключительную актуальность проблем глобальной экологии и выдвижение политической концепции приоритета общечеловеческих ценностей.

Современная эпоха характеризуется тем, что экономическое и социальное развитие общества пришло в явное противоречие с ограниченными ресурсовоспроизводящими и жизнеобеспечивающими возможностями биосферы. Происходят истощение естественных ресурсов суши и океана, безвозвратная потеря различных видов растений и животных, загрязнение всех составляющих природной среды, упрощение и деградация экосистем [1–50, 53–58, 60–77, 80–89, 94–110].

1.1. Ключевые направления биосферных и экологических исследований

Все виды природопользования – промышленное, сельскохозяйственное, лесохозяйственное, рекреационное и др. – сопровождаются не только получением желаемых частных результатов, но и разветвленными экологическими, эколого-экономическими и эколого-социальными последствиями. Возникновение этих последствий предопределило кризисную для развития общества экологическую ситуацию во многих странах и на земном шаре в целом. Изменение стратегии природопользования, непрерывное ее совершенствование с целью преодоления негативных последствий в отдельных регионах и в глобальном масштабе – основная научная проблема оптимизации природопользования. Для ее решения необходимы исследования по следующим важнейшим направлениям: экологическим, технологическим и экономико-правовым (гуманитарным), которые включают целый ряд аспектов [23, 39].

1. Изучение закономерностей функционирования биосферы как единства образующих ее экосистем и природно-хозяйственных систем

различного масштаба, от локального до глобального. Исследование биологических, геохимических, геофизических и антропогенных факторов и процессов, обуславливающих и изменяющих воспроизводство естественных ресурсов и условий в биосфере. Выявление характерных форм трансформации экосистем и природно-хозяйственных систем. Разработка математических моделей экосистем и природно-хозяйственных систем различного масштаба. Долгосрочное прогнозирование их изменений при различных „сценариях” природопользования. Использование моделей для экологического нормирования хозяйственных воздействий на природную среду, экологической экспертизы действующих и планируемых производств, взаимного согласования планов мероприятий различных ведомств по охране природной среды.

Важнейшими направлениями исследований являются эволюция биосферы, энерго- и массообмен в биосфере, биологические аспекты охраны природы, химия биосферы, методология системных исследований и математического моделирования биосферных процессов, геоэкоинформатика.

2. Разработка оптимальной стратегии природопользования в энергетике, промышленности, сельском хозяйстве, лесном хозяйстве, градостроительстве и других важнейших отраслях народного хозяйства, обеспечивающей недопустимость неприемлемых антропогенных воздействий физического, химического и биологического характера. Выявление перспективных направлений уменьшения энерго-материало- и водоемкости производств; комплексное использование естественных сырьевых ресурсов; утилизация производственных отходов путем внутри- и межотраслевого оборотного их использования; воспроизводство почвенной органики на основе оборота вещества между растениеводством и животноводством и рециркуляции веществ в ландшафтах; предупреждение химического и бактериального загрязнения природной среды и пищевой продукции в сельскохозяйственном производстве и т. д. Обоснование методологии региональной малоотходной системы технологических процессов.

Ведущими направлениями исследований являются экология промышленного производства, экология сельскохозяйственного производства, экология человека, геофизические аспекты охраны природы, химия окружающей среды, региональные экологические проблемы.

3. Разработка методов экономической оценки природных ресурсов и последствий воздействия на биосферу. Развитие методов определения экономической и социальной эффективности общественного производства, в полной мере учитывающих экологические, экономические и социальные последствия их функционирования. Разработка экономического механизма, стимулирующего выполнение требований охраны природной среды и рационального использования естественных ресурсов на уровне предприятий, отраслей, краев, областей и стран в целом. Совершенствование научных основ

законодательства, регламентирующего природопользование частных лиц, предприятий, отраслей и отдельных организаций. Разработка стратегических направлений экологического воспитания и обучения всех категорий населения.

Целый ряд проблем глобальной экологии (изменения климата и слоя озона, динамика растительного покрова и биосферы в целом) свидетельствует о возможности катастрофических последствий, ставящих под угрозу благополучное существование современной цивилизации. Следует, однако, подчеркнуть, что не только глобальные, но и региональные экологические проблемы содержат серьезные неопределенности, обусловленные двумя главными причинами: 1) отсутствием достаточно репрезентативных данных наблюдений, характеризующих реальные экологические ситуации; 2) схематичностью имитационных математических моделей, предназначенных для воспроизведения (и прогноза) происходящих в природе процессов.

С точки зрения проблематики глобальной экологии все возрастающую роль играет комбинированное использование обычных и спутниковых средств наблюдений за оценками состояния природной среды и ее возможных изменений в будущем. Задача изучения Земли как целостной природной системы, поставленная Международной геоферно-биосферной программой (МГБП), может быть решена только на основе широкого применения космических средств наблюдений [21, 30]. Важное значение в этой связи имела подготовка к Международному году космоса [25].

Отметим в связи с обсуждаемой проблемой, что представители Академии наук СССР и Национальной Академии наук США, заключив в декабре 1988 г. соглашение о создании Межакадемического комитета по глобальной экологии, сформулировали ключевые проблемы в этой области [25].

I. Глобальные энергетические и биогеохимические круговороты – индустриальные и биосферные процессы:

1) перспективы развития энергетики и ее возможное воздействие на экологические системы;

2) слежение за „здоровьем” глобальных почв и растительности, включая управляемые системы, с особым вниманием на первых порах к данным для России и США;

3) определение количества индустриальных выбросов загрязнений в обеих странах в прошлом и в настоящее время, обмен соответствующими данными и оценками ситуаций.

II. Обоснование систем наблюдений для оценки глобальных изменений:

1) развитие новых систем наблюдения, базирующихся на земле и в космосе;

2) программы обмена данными, полученными со спутников;

3) анализ адекватности существующих и планируемых наблюдательных систем для оценки глобальных изменений.

III. Глобальные изменения в биоразнообразии:

- 1) описание и наблюдения за биоразнообразием в России и США и по возможности во всем мире;
- 2) развитие эффективных систем наблюдения для приближенных оценок биологической экстинкции;
- 3) пути ослабления процесса вымирания видов и потери разнообразия;
- 4) обсуждение связей между биогеохимическими круговоротами и биоразнообразием.

IV. Теоретические и методологические основы для понимания экологических изменений:

- 1) выявление подходов, основанных на методах нелинейной физики и современной математики, для исследований неустойчивости экологических систем;
- 2) анализ методологической базы для предсказания глобальных экологических изменений.

V. Обсуждение и поддержка соответствующих международных усилий:

- 1) Международная геосферно-биосферная программа и другие международные программы;
- 2) двусторонние и региональные межправительственные программы;
- 3) изучение и в случае необходимости поддержка международных договоров в области изучения окружающей среды.

Выдвижение на передний план общечеловеческих ценностей, связанное с усиливающейся взаимозависимостью государств и обострением экологических проблем, улучшение политической обстановки в мире и ослабление угрозы ядерной войны определяют необходимость значительно более широкого понимания проблемы глобальной безопасности, чем преобладавшее до недавнего времени. Несомненно, что в центре этой проблемы оказывается теперь глобальная экология и особенно ее социально-экономические аспекты. Одним из важных проявлений подобной тенденции является обсуждение в Международном институте прикладного системного анализа (МИПСА) рассчитанного на 1989–1992 гг. нового Проекта по управлению глобальной безопасностью и риском (ПУГБР), в котором ключевая роль должна принадлежать прежде всего обоснованию приоритетов [26, 29].

Главная цель ПУГБР – анализ необходимости и перспектив новых подходов к решению проблем управления глобальной безопасностью и риском, имея в виду прежде всего следующие задачи.

1. Изучение наиболее важных проявлений риска, которые могут воздействовать на выживание мирового сообщества, включая экологические, демографические, экономические, политические, военные, гуманитарные и социальные аспекты риска. Целью подобных исследований должно быть установление допустимых порогов риска („границных условий”), нарушение которых ведет к глобальной угрозе

жизни человека и цивилизации. Принципиально важное значение имеет интерактивный подход к решению обсуждаемых проблем и обоснование (на этой основе) приоритетов.

2. Разработка подхода для раннего распознавания и оценки опасности каждого из компонентов риска, а также роли взаимодействия между ними.

3. Поиски путей более эффективного использования существующих соглашений, программ и институтов для решения задач глобальной безопасности, а также расширения и углубления международного сотрудничества с целью более полного и надежного слежения за антропогенными воздействиями, создающими ситуации риска.

4. Расширение возможностей многосторонних организаций и особенно системы агентств и организаций ООН с точки зрения их роли в обеспечении глобальной безопасности, в соответствии с принципами Хартии ООН.

5. Разработка практических предложений, обосновывающих акции, необходимые для обеспечения глобальной безопасности.

6. Обеспечение доступности полученных результатов и рекомендаций для ООН, правительств и людей на земном шаре.

7. Функционирование консультативного органа для ООН.

Следующие направления разработок по проблемам управления глобальной безопасностью и риском наиболее актуальны: 1) глобальная окружающая среда, воздействие на нее и проблемы риска; 2) политическая и военная безопасность, воздействующие на нее факторы и проблемы риска; 3) демографические изменения в глобальных масштабах; развитые и развивающиеся страны; 4) развитие экономики и технологий. Возможные в этой связи стратегии реакции на возникающие ситуации включают: 1) новое определение понятия безопасности; 2) анализ возможностей управления окружающей средой; 3) проблемы военно-политической безопасности; 4) возможные формы международного сотрудничества и совместные акции.

Понятия глобальной (международной) безопасности и риска не имеют пока что достаточно четкого и согласованного определения, поскольку они охватывают угрозы, которые все еще неполностью осознаны и поняты. До недавнего времени международная безопасность отождествлялась с военной безопасностью, хотя совершенно ясно, что такое понимание является неадекватным. Безопасность в широком смысле следует понимать как способность противостоять угрозам по отношению: 1) к жизни, здоровью, благополучию и основным правам человека; 2) к источникам жизнеобеспечения; 3) к ресурсам, необходимым для их обеспечения; 4) к социальному порядку; 5) к способности людей адаптироваться к изменяющимся обстоятельствам. Существуют три главные категории угрозы безопасности:

1) военные угрозы: глобальная ядерная война; развитие и распространение оружия массового уничтожения, а также возрастающая точность систем доставки; международные перевозки вооружений;

крупные войны с применением обычного оружия (особенно в районах возможного производства ядерного оружия); локальные конфликты;

2) экономические и социальные угрозы: массовая нищета, порождающая голод; экономические коллапсы; дестабилизация процессов перемещения капитала; излишний рост населения и урбанизация; международная массовая миграция; манипуляции с генами; пандемии;

3) экологические угрозы: изменения химического состава атмосферы и их последствия (рост концентрации „парниковых газов” и глобальное потепление, закисление окружающей среды и др.); загрязнение природных пресных вод, океанов и прибрежных акваторий; обезлесивание и опустынивание, эрозия почв, потеря плодородия земель; риск, связанный с биотехнологией, опасные выбросы загрязнителей, а также производство, перевозка и применение токсических веществ; расхождения между странами по вопросам обеспечения здоровья и безопасности человека, а также передача опасных технологий в развивающиеся страны, создающая угрозы населению.

Предотвращение перечисленных угроз требует превентивных акций, стратегия которых должна предусматривать: обоснование и приоритеты целей; определение масштабов риска, мониторинг и оценку роли соответствующих процессов; разработку путей решения проблем с учетом научно-технических возможностей, социально-экономических аспектов и существующих международных соглашений; оценку эффективности акций.

Целесообразно рассматривать три аспекта проблемы глобальной безопасности:

1) возмущающие воздействия, которые являются объектом регулирования, ограничения и контроля;

2) последствия возмущающих воздействий, исключение которых требует применения различных стратегий приспособления для обеспечения устойчивого развития;

3) реагирование на происходящие изменения с целью изменения возмущающих воздействий и обеспечения глобальной безопасности.

К числу важнейших возмущающих воздействий относится динамика народонаселения, проявляющаяся в спаде темпов роста (за исключением 1988 г., когда имел место рост с 1.7 до 1.8%), но увеличении абсолютной численности населения (по-видимому, максимум порядка 8 млрд человек будет достигнут в середине следующего столетия), что имеет наиболее важное значение. Хотя масштабы нищеты, неграмотность и голод в мире относительно уменьшились, абсолютное число людей, страдающих от подобных условий, возрастает. Нищета и неграмотность оказываются такими факторами, которые повышают рождаемость (но, конечно, и детскую смертность). Концентрация роста населения в развивающихся странах, а также сопровождающая возрастание населения городов безработица порождают усиление социально-экономической напряженности.

Фактором ключевого значения являются воздействия развивающихся индустрии и сельского хозяйства на окружающую среду и биосферу. Хорошо известны связанные с этим проблемы глобальных изменений климата и слоя озона, вырубки лесов и опустынивания, кислотных осадков и их влияния на биосферу, загрязнения атмосферы, почв и океана. Огромную опасность таит в себе продолжающееся уменьшение биоразнообразия. Проявлением всех этих проблем служит динамика биосферы, определяющая замкнутость глобальных круговоротов вещества с исключительно высокой точностью благодаря биоразнообразию [13, 14].

1.2. Пределы устойчивости биосферы

Принципиально важное обстоятельство состоит в том, что естественные процессы в биосфере обладают наибольшей возможной скоростью изменения свойств окружающей среды. Эта скорость в десятки раз превосходит современные скорости антропогенного воздействия на окружающую среду и в 10 тысяч раз средние скорости геофизических процессов [13, 14].

Массы (концентрации) и скорости их изменения для химических веществ, вовлеченных в биогеохимические круговороты, можно характеризовать массами и скоростями изменения органического и неорганического углерода. Массообмен остальных элементов можно оценить по массообмену углерода, исходя из характерных для биоты стехиометрических соотношений. Запасы биологически активного органического и неорганического углерода в окружающей среде совпадают по порядку величины и примерно в 10 раз превышают годовую первичную продукцию. Следовательно, при наличии только синтеза или только разложения органических веществ эти запасы будут израсходованы за время порядка десятка лет. После этого все жизненные процессы остановятся. Такова природа одного из „границных условий” для биосферы и соответственно глобальной безопасности.

В отсутствие антропогенных возмущений потоки вещества за счет синтеза и разложения органических веществ естественной биотой совпадают с точностью до одной сотой процента, что делает окружающую среду устойчивой в геологических масштабах времени.

Медленные изменения окружающей среды за геологические периоды времени в результате геофизических процессов могут компенсироваться за счет биологических процессов. Например, поток неорганического углерода из земных недр в окружающую среду компенсируется потоком углерода, который поступает в осадочные породы в результате выбывания из биотического круговорота. Разность между потоками углерода, определяемыми синтезом и разложением, которая обусловлена слабым нарушением баланса (за пределами одной сотой процента), поддерживается биотой таким образом, чтобы

скомпенсировать медленное геофизическое изменение окружающей среды. Масса органического углерода в осадочных породах на 3–4 порядка величины превосходит массу углерода в биоте и окружающей среде. Отсюда следует, что чистый поток неорганического углерода из земных недр в окружающую среду совпадает со средним потоком органического углерода в осадочные породы с точностью до 3–4 значащих цифр. Таким образом, в целом биота контролирует до 7–8 значащих цифр в потоках синтеза и разложения органических веществ.

Из того, что биота поддерживает определенный химический состав окружающей среды, следует, что она должна подчиняться принципу Ле Шателье: при возникновении внешних возмущений, нарушающих состояние окружающей среды, в биоте должны возникать процессы, компенсирующие это возмущение. Компенсация возмущений окружающей среды биотой может происходить за счет направленного изменения соотношения между синтезом и разложением органических веществ [13, 14].

Синтез и разложение органических веществ производятся совершенно различными видами живых организмов практически во всей существующей ныне биоте. Очевидно, что совпадение четырех и контроль семи значащих цифр в усредненных по сезонам изменениях потоков синтеза и разложения органических веществ не могут быть случайными. В процессе миллионов лет эволюции были отобраны только те виды, а также сообщества видов, которые способны это обеспечить. Именно эти сообщества видов совместно со сформированными ими компонентами окружающей среды и составляют биосферу Земли.

Фундаментальный факт состоит в том, что компенсация возмущений окружающей среды может производиться только невозмущенной или слабо возмущенной биотой. Очевидно, например, что при уничтожении биомассы биоты процессы синтеза и разложения органических веществ прекратятся. При замене естественной биоты культурными видами, по-видимому, во всех случаях последние теряют способность не только компенсировать возмущения внешней среды, но и обеспечивать замыкание с необходимой точностью круговоротов веществ при отсутствии возмущений.

Сохранение разнообразия видов живых организмов, возникшего в результате длительной эволюции, необходимо не столько вследствие уникальности их генофонда, а главным образом в силу уникальности их способности в составе естественных сообществ обеспечивать устойчивость окружающей среды. Ясно также, что функции глобальной стабилизации окружающей среды не могут выполняться только сообществами в рамках охраняемых территорий, составляющих не более 1–2% территории суши. Необходимо обеспечение биологического разнообразия на всей территории суши.

Имея в виду решение проблемы глобальной экологической безопасности, можно обсуждать два стратегических направления развития цивилизации:

1) сохранение слабо возмущенной биоты, способной обеспечить замкнутость круговоротов веществ и стабильность окружающей среды в необходимом для этого объеме (а не только в генных банках и резерватах); имеются веские основания полагать, что допустимые пределы возмущения биосферы уже превышены и человечеству придется сократить свою долю потребления продукции биосферы, а следовательно, и население, а также производство промышленной продукции;

2) развитие управляемых человеком безотходной технологии и искусственных (культурных) сообществ биоты в направлении создания ноосферы; по-видимому, в ноосфере, как и в биосфере, более 99 % энерго- и массообмена будет затрачиваться на поддержание замкнутости круговорота веществ и стабилизацию окружающей среды; на развитие цивилизации человечества остается менее 1 %, т. е. меньше того, что человечество имело в условиях невозмущенной биосферы.

Отмеченные обстоятельства позволяют сделать два вывода:

1) необходимым условием обеспечения глобальной экологической безопасности и, следовательно, устойчивого социально-экономического развития является сохранение биосферы;

2) неотложной задачей является разработка и осуществление глобальной системы экологических наблюдений с использованием обычных и спутниковых средств наблюдений для обеспечения адекватного мониторинга процессов в биосфере и окружающей среде с целью предотвращения дальнейшего разрушения биосферы и контроля за эффективностью мер по ее восстановлению.

1.3. Социально-экономические аспекты устойчивого развития

В связи с проблемой обеспечения устойчивого социально-экономического развития особое внимание заслуживают уже упоминавшиеся глобальная динамика народонаселения и современные тенденции развития технологий в таких условиях, когда уровень цен на энергоносители не стимулирует разработки энергоемких и ресурсосберегающих (малоотходных) технологий. Усиливаются демографические контрасты между развитыми странами (спад численности и повышение среднего возраста населения) и развивающимися странами (рост численности и понижение среднего возраста населения). Имеющий ключевое значение для развивающихся стран процесс индустриализации порождает значительное возрастание их вклада в эксплуатацию ресурсов биосферы (это прежде всего касается вырубки лесов) и загрязнение окружающей среды, проявляющееся, в частности, в росте концентрации „парниковых газов” в атмосфере.

Следует иметь в виду четыре категории угроз, связанных с изменениями в окружающей среде: 1) непосредственные угрозы существованию человека (голод, болезни, радиация и др.); 2) угрозы террито-

риям (опустынивание, подъем уровня океана, трансграничный перенос загрязнений, изъятие стока рек странами, расположенными в верхнем течении рек, и др.); 3) угрозы системам жизнеобеспечения (сельскому и рыбному хозяйству, ресурсам пресной воды, лесам и др.); 4) угрозы экономическому развитию (дефицит природных ресурсов, нестабильность финансовой системы и рынков и др.).

Преобладание дешевого сырья как статьи экспорта из развивающихся стран приводит к росту их долга и еще более усиливает глобальную социально-экономическую напряженность. Сформировался сложный узел проблем глобальной безопасности, экологические, социально-экономические, политические и другие аспекты которых оказались неразделимыми. Примеры, иллюстрирующие этот вывод, многочисленны: изменения глобального климата и их воздействие на сельское, водное и лесное хозяйство; кислотные осадки и деградация лесов; сокращающиеся ресурсы и ухудшающееся качество питьевой воды; труднопредсказуемые последствия уменьшения биоразнообразия и др. Все эти процессы стимулируют развитие неустойчивости в региональном и глобальном масштабах, определяют возникновение ситуации, при которой проблемы национальной безопасности могут быть решены только в контексте глобальной безопасности на основе эффективного международного сотрудничества. Того же требует и решение таких проблем, как расширение возможностей обладания ядерным оружием, а также доступность химического и биологического оружия.

Обеспечение глобальной безопасности требует междисциплинарных исследований с целью обоснования таких рекомендаций правительством и ООН, которые окажутся эффективными и практически реализуемыми.

В настоящее время можно сформулировать следующие наиболее важные рекомендации.

1. Необходимы разработка и принятие международного соглашения на уровне Генеральной Ассамблеи ООН о создании оптимизированной глобальной системы экологического мониторинга, основанной на применении обычных и спутниковых методов наблюдений. Использование данных такого рода наблюдений, как входной информации для численных имитационных моделей глобальной экодинамики (динамика биосферы, изменения климата и слоя озона, динамика водных и лесных ресурсов и др.), которые требуют дальнейшего серьезного развития, позволит осуществлять функционирование глобальной службы раннего предупреждения об опасных тенденциях развития экологической ситуации и обосновать возможные сценарии развития и меры, необходимые для предотвращения катастрофических последствий антропогенных воздействий на окружающую среду и биосферу.

2. Разумеется, данные глобального экологического мониторинга и оценки тенденций развития экологической ситуации должны быть доступны всем странам. Решение этой задачи, как и соглашение о соз-

дании оптимизированной системы глобального мониторинга, может быть реализовано лишь на основе учреждения в системе ООН органа, способного взять на себя ответственность за проблему глобальной экологической безопасности.

3. Поскольку имеются основания считать, что Земля уже перенаселена, необходимы срочные усилия на уровне ООН, стимулирующие дальнейшие исследования в области эколого-демографической проблематики и выработку рекомендаций, осуществление которых обеспечит устойчивое социально-экономическое развитие на земном шаре.

2. МЕЖДУНАРОДНАЯ ГЕОСФЕРНО-БИОСФЕРНАЯ ПРОГРАММА (МГБП): ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Эволюция геосферы и биосферы характеризуется усиливающимся взаимодействием их компонентов, что определяется прежде всего возрастающим антропогенным воздействием на окружающую среду. Подобное воздействие проявляется в первую очередь в форме осуществляемого человеком преобразования природы и усиливающихся антропогенных нагрузок на окружающую среду, которые сказываются практически на всех компонентах геосферы и биосферы (в ряде случаев в глобальных масштабах) и требуют системного подхода к изучению рассматриваемых процессов [21, 28]. Выявление законов воздействия компонентов геосферы и биосферы требует междисциплинарных исследований беспрецедентной сложности, выдвигая соответствующую проблематику на передний план современного естествознания.

2.1. Приоритеты МГБП

Необходимость комплексных исследований геосферы и биосферы ощущается с давних пор. За последние десятилетия это наиболее ярко проявилось в осуществлении Программы Международного геофизического года (МГГ) и последовавшего за ним Международного года спокойного Солнца (МГСС), а позднее Всемирной службы погоды (ВСП) и Программы исследований глобальных атмосферных процессов (ПИГАП). Недавно начато выполнение широкомасштабной Программы по изучению средней атмосферы (ПСА), Международной программы изучения литосферы, Всемирной климатической программы (включающей как компонент Всемирную программу исследований климата – ВПИК), специализированной Международной программы по спутниковой климатологии облачного покрова (МПСКО), крупной советской программы „Разрезы”, главной целью которой является изучение роли океана в короткопериодных изменениях климата. На решение последней задачи направлены и две новые международные программы: Эксперимент по изучению циркуляции Мирового океана (ЭЦМО) и Исследования тропического океана и глобальной атмосферы (ТОГА). Весьма актуальны осуществляемые под эгидой СКОПЕ и ЮНЕПа международные проекты по изучению биогеофизических

круговоротов различных компонентов, американская программа по химии глобальной тропосферы, выполняемые в рамках ЮНЕСКО Международная гидробиологическая программа и программа „Человек и биосфера” и многие другие [20, 28].

Иллюстрацией разнообразия проблематики МГБП могут служить следующие направления разработок в рамках СКОПЕ:

- 1) круговороты углерода и биогенов в озерах и эстуариях;
- 2) круговорот серы в континентальных и водных экосистемах;
- 3) процессы закисления в тропических странах;
- 4) круговорот фосфора в континентальных и водных экосистемах;
- 5) бюджеты органического вещества;
- 6) влияние пестицидов;
- 7) организмы, созданные путем генной инженерии в окружающей среде;
- 8) опускание прибрежных регионов и подъем уровня моря;
- 9) экотоны в изменяющейся окружающей среде;
- 10) обмен малыми газовыми компонентами между биосферой и атмосферой;
- 11) экосистемные эксперименты;
- 12) загрязнение подземных вод.

В стадии рассмотрения находятся такие проекты:

- 1) поток частиц в океан;
- 2) исследования по проблеме генной инженерии в окружающей среде;
- 3) долговременные экологические исследования;
- 4) биогеохимический метаболизм малых водосборов;
- 5) применение научной информации для решения проблем устойчивого развития биосферы;
- 6) биогеохимические „траектории” радионуклидов;
- 7) влияние изменений климата на здоровье человека.

Еще более широкой является национальная программа биосферных и экологических исследований.

Каждая из перечисленных (и целый ряд неупомянутых) программ характеризуется комплексным подходом к решению соответствующих задач. Анализ глобальной экологической проблематики в целом ясно свидетельствует, однако, об острой необходимости более широкой координации усилий, направленных на достижение целей различных программ, в обосновании „суперпрограммы”, охватывающей ключевые аспекты изучения геосферы.

Именно эти обстоятельства стимулировали разработку долговременной (полное развертывание систем наблюдений намечено на 90-е годы) Международной геосферно-биосферной программы, главной целью которой должны стать исследования глобальных изменений геосферы, особенно с точки зрения антропогенных воздействий на биогеохимические круговороты углерода, азота, серы, фосфора,

воды, динамики таких факторов жизнеобеспечения, как радиация, качество воздуха и природных вод, плодородие почв, а также связей между биосферными и геофизическими явлениями [74–76, 104].

Сложившаяся ситуация требует прежде всего анализа ключевых проблем исследований геосферы–биосферы. Следующие обстоятельства имеют в связи с этим первостепенное значение. Первое состоит в том, что в масштабах времени порядка десятилетия и более особенно отчетливо проявляется тот факт, что компоненты геосферы составляют единую взаимосвязанную систему, причем для взаимодействия отдельных компонентов этой системы характерны проявления синергизма (обратных связей, которые приводят иногда к взаимоусилению различных процессов). Именно это обстоятельство определяет исключительную важность системного подхода, междисциплинарных исследований физических, химических и биологических процессов на основе реализации единой программы.

Второе важное обстоятельство заключается в том, что возрастающий уровень антропогенных нагрузок на геосферу–биосферу еще более отчетливо (чем при рассмотрении только природно обусловленных процессов) определяет необходимость изучения процессов и изменений в глобальных масштабах. С точки зрения планирования системы наблюдений это свидетельствует о ведущей роли космических средств наблюдений (при несомненно сохраняющемся значении обычных наблюдательных систем как сейчас, так и в будущем) [21, 30], а для проблематики по существу особенно актуальными становятся палео- и сравнительно-планетные аналогии [22, 27]. Это означает, что исследования геосферы должны тесно сочетаться с изучением происхождения и эволюции Солнечной системы. Значимость подобного вывода обусловлена тем, что система геосфера–биосфера не замкнута, поскольку на нее оказывают воздействие разнообразные космические факторы (солнечная активность, галактические космические лучи и др.). Несомненно, таким образом, что в качестве объектов изучения геосферы–биосферы ключевую роль играют атмосфера, океан, литосфера и солнечно-космические факторы.

Существенно, что некоторые антропогенные воздействия на глобальную геосферу стали заметными уже сейчас (это проявляется, например, в росте концентрации CO_2 и окислов азота, свидетельствующем о воздействии на глобальные круговороты углерода и азота) и могут стать значительными в течение ближайших десятилетий, тогда как наша способность предпринимать контрмеры имеет такой же (или больший) характерный масштаб времени, что обуславливает неотложность обсуждаемых проблем.

Естественно, что при разработках по междисциплинарной проблеме исключительной сложности перспективное значение приобретает выявление ее приоритетных аспектов. К числу их относится, в частности, проблема климата и его изменений. Климат формируется как результат взаимодействия компонентов климатической системы

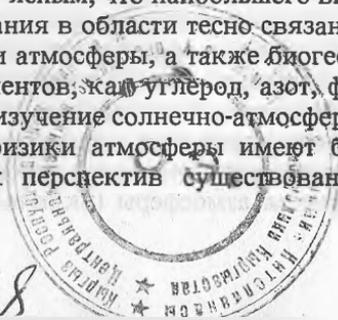
(„атмосфера–гидросфера–литосфера–криосфера–биосфера”), для которой типично существование многочисленных обратных связей. В настоящее время в естествознании нет других проблем, которые характеризовались бы большей комплексностью, проявляющейся в глобальных масштабах, и необходимостью учета сложных антропогенных воздействий.

Все возрастающее внимание в связи с проблемой климата привлекает роль взаимодействия геосферы и биосферы. Эта роль отчетливо выявляется, в частности, при рассмотрении задачи о влиянии антропогенно обусловленного возрастания концентрации углекислого газа на климат, породившей за последние годы противоречивые выводы относительно связанных с этим оценок возможных изменений климата [20, 28]. Это вызвано главным образом двумя обстоятельствами: 1) отсутствием достаточно надежных моделей глобального круговорота углерода (до сих пор остается не вполне ясным вклад морской и континентальной биоты); 2) несовершенством теории климата с точки зрения интерактивного учета процессов в геосфере–биосфере. Хотя проблема климата может служить иллюстрацией установленной по данным наблюдений важности учета влияния космических факторов, до сих пор остаются неясными физические механизмы, определяющие такого рода влияния.

Важность проблемы климата обусловлена и ее исключительным практическим значением. Хорошо известна зависимость хозяйственной деятельности человека от климатических условий (в особенности это относится, конечно, к сельскому хозяйству). В последнее время обозначился новый аспект проблемы, связанный с возможным воздействием ядерной войны на климат и биосферу [19, 30]. Полученные в этой связи оценки свидетельствуют о неизбежности глобальной экологической катастрофы, обусловленной, в частности, сильным похолоданием климата („ядерной зимой”), которое должно возникнуть в результате спада поступления солнечной радиации к земной поверхности из-за сильного ослабления ее дымками, образовавшимися от пожаров в лесах и городах после многочисленных ядерных взрывов. Еще более важное значение имеет нестабильность климата в условиях такого рода сильного воздействия.

Имея в виду актуальность проблемы климата, необходимо сформулировать в рамках МГБП соответствующий междисциплинарный раздел с учетом уже осуществляемой ВПИК и других более частных программ (ЭЦМО, ТОГА, МПСКО и др.). Если учесть специфику такого рода программ, то станет ясным, что наибольшего внимания в рамках МГБП требуют исследования в области тесно связанности между собой проблем физики и химии атмосферы, а также биогеохимических круговоротов таких компонентов, как углерод, азот, фосфор и сера. Несомненно существенно изучение солнечно-атмосферных связей.

Вопросы химии и физики атмосферы имеют большое значение с точки зрения оценок перспектив существования биосферы (ее



продуктивности) в условиях усиливающихся антропогенных нагрузок [4–14]. Важное место здесь безусловно должна занимать проблема воздействий на слой озона в стратосфере, защищающий биосферу от губительных воздействий жесткой ультрафиолетовой солнечной радиации.

Хотя выводы относительно антропогенных воздействий на озон претерпевали неоднократные изменения [21], несомненно, что сохраняется озабоченность относительно влияния на общее содержание озона и вертикальный профиль концентрации озона выброса хлорфторуглеродных соединений (ХФУС), углекислого газа, окислов азота и метана. Стало ясным, что воздействие этих компонентов является существенно взаимосвязанным и поэтому оценки для отдельных (изолированных) компонентов нельзя считать корректными.

Существуют несомненные доказательства (по данным наблюдений) возрастания концентрации ХФУС, метилхлороформа, углекислого газа, закиси азота и метана. Однако отсутствие надежных данных об источниках и стоках перечисленных газов не позволяет получить реалистические прогнозы их трендов в будущем (это особенно справедливо для метана).

Решение проблемы озона, являющейся первостепенным компонентом ПСА, требует осуществления широкой программы лабораторных, полевых и теоретических исследований взаимодействующих физических, химических и фотохимических процессов в тропосфере и стратосфере, слежения за изменениями химического состава атмосферы (по большому числу компонентов) в глобальных масштабах.

Что касается химии тропосферы, то наиболее актуальны исследования: 1) влагооборота; 2) процессов, определяющих динамику оксидантов, особенно O_3 , SO_2 и NO_2 ; 3) механизмов сухого и влажного осаждения загрязняющих компонентов на поверхности суши и водных бассейнов; 4) процессов, определяющих содержание в нижних слоях атмосферы аэрозоля и таких газов, как CO_2 , N_2O , CH_4 , NH_3 и H_2O ; 5) воздействия оптически активных компонентов атмосферы на радиационный режим и климат. Как и во всех остальных случаях, принципиально важную роль играет взаимодействие химических процессов в тропосфере и стратосфере.

Для понимания биогеохимических круговоротов необходимо изучение таких контролирующих их факторов, как: 1) природные и антропогенные выбросы малых компонентов в тропосферу; 2) их дальний перенос; 3) химические превращения (включая газофазные реакции); 4) удаление из стратосферы малых газовых и аэрозольных компонентов (в этой связи большое внимание привлекает роль облачного покрова). Первостепенный интерес представляют исследования таких компонентов биосферы, как леса в тропиках и умеренных широтах, степи и саванна, тундра, сельскохозяйственные земли, а также прибрежных апвеллингов и процессов в открытом океане.

Изменения климата определяются важной ролью малых оптически активных компонентов атмосферы (включая озон) в формировании

парникового эффекта атмосферы, изменения которого являются энергетической первопричиной антропогенных воздействий на климат. В качестве иллюстрации важности вопроса можно сослаться на обнаруженное за последние годы возрастание содержания озона в тропосфере. Оценки показали, что вклад этого возрастания в усиление парникового эффекта эквивалентен эффекту возрастания концентрации углекислого газа.

В области имитационного моделирования наиболее актуальна задача разработки интерактивных моделей с учетом динамических и фотохимических процессов для воспроизведения глобальных бюджетов O_3 , CO и других критически существенных компонентов. По-прежнему важную роль при изучении регионального переноса, геохимических балансов и поисках новых химических реакций должны играть приближенные одномерные и двухмерные модели. Долговременные цели должны предусматривать изучение роли комплексных гетерогенных процессов в формировании глобального круговорота различных компонентов, причем особое внимание следует уделить мало изученным процессам в удаленных (фоновых) районах атмосферы.

Во многих отношениях химический состав атмосферы сформировался и подвергается изменениям в результате взаимодействия с биосферой. Биосфера представляет собой главный источник различных углеводородных соединений и такого летучего галогенуглеродного соединения, как метилхлороформ. Взаимосвязи соответствующих процессов отнюдь не всегда являются прямыми и однозначными. Например, химические реакции с участием окислов азота в тропосфере могут приводить как к росту, так и к спаду содержания озона, что в свою очередь влияет на растительный покров. Изменения концентрации N_2O , CH_3Cl и CH_4 в тропосфере воздействуют на содержание озона в стратосфере, и это также оказывает воздействие на биосферу.

Важнейшей задачей является изучение физических, химических и биологических процессов, ответственных за выделение и усвоение различных компонентов биосферой (в пределах различных экосистем), и, с другой стороны, реакции биосферы на изменчивость физических характеристик и химического состава атмосферы. Приоритетным оказывается в связи с этим слежение за такими газами, содержание которых уже изменяется в результате хозяйственной деятельности человека. К числу подобных газов относятся CO_2 , CH_4 , N_2O и SO_x , а также окись углерода.

Имеется много оснований считать, что химические и фотохимические процессы в стратосфере и мезосфере, изменяющиеся под воздействием космических факторов (вспышки солнечных протонов, галактические космические лучи), ответственны за механизмы, определяющие воздействие космических факторов на климат.

Ключевой фактор формирования химического состава атмосферы — ее взаимодействие с океаном, который является не только областью стока CO_2 и окислов азота, но и источником (в районах при-

брежных низменностей и продуктивных зон) CH_4 , H_2S и $(\text{CH}_3)_2\text{S}$, а также источником галогенов, закиси азота и водяного пара для атмосферы. Актуальная задача состоит в изучении газообмена между океаном и атмосферой как следствия соответствующих химических, физических и биологических процессов. Особого внимания требует кардинальная роль океана в формировании круговорота серы. Серьезное внимание привлекает взаимодействие процессов в океане и на суше через посредство рек, эстуариев и прибрежных зон. В данном случае прежде всего необходимы оценки поступления в океан пресных вод, углерода, фосфора и взвешенного в воде вещества.

Важную роль как оптически активный компонент атмосферы, воздействующий на формирование климата, играет атмосферный аэрозоль [2, 20]. Вулканический стратосферный аэрозоль, вызывающий сильные и продолжительные возмущения радиационного режима и сопутствующие им изменения климата, является наиболее существенным фактором воздействия природного аэрозоля на радиацию и глобальный климат (важным региональным фактором служат пылевые бури). Наличие антропогенного тропосферного аэрозоля сказывается в таких последствиях, как тренд возрастания замутненности атмосферы и образование аэрозольной дымки в высоких широтах северного полушария. Важное значение имеет во всех случаях механизм газофазного образования аэрозоля (в случае вулканического стратосферного аэрозоля он является доминирующим), что определяет взаимозависимость между биогеохимическими круговоротами серы и азота и процессами формирования атмосферного аэрозоля. Требуется серьезного внимания почти полная неизученность воздействия аэрозоля на процессы образования и разрушения облачного покрова. Выше уже упоминалось критически важное значение дымового аэрозоля, возникающего в результате пожаров, порожденных ядерными взрывами.

Еще один несомненно приоритетный компонент МГБП – проблема биологической продуктивности на суше и в океане. Условия биологической продуктивности на суше определяются ресурсами воды, биогенных компонентов и света, а для океана важны, естественно, лишь два последних фактора. Отсюда следует, что для оценки условий на суше важно располагать информацией о глобальном пространственно-временном распределении и интенсивности осадков. Решающее значение как факторы биопродуктивности океанов имеют выносимые реками в прибрежные зоны океана потоки биогенных компонентов, которые в результате перемешивания поступают в конечном счете в глубокие слои океана, а также перенос вещества с суши к океану через атмосферу.

Оценки второго фактора осложняются ненадежностью современных моделей климата с точки зрения описания глобального распределения осадков и необходимостью учета возрастающих антропогенных выбросов оптически активных малых газовых компонентов, что приводит к изменению температурного режима, воздействует на

влагооборот, вызывает формирование кислотных осадков, изменения концентрации токсичных газов, плодородия почв, содержания питательных компонентов в реках и шельфовой зоне. Существенную роль в воздействии на биопродуктивность может играть и обусловленное загрязнением атмосферы изменение интенсивности ультрафиолетовой солнечной радиации на уровне земной поверхности. Важная задача состоит в том, чтобы, выявив природно обусловленную изменчивость биопродуктивности, проанализировать антропогенное воздействие на биосферу. Решение этой сложной задачи потребует разработок по ряду главных направлений.

Одно из них – глобальный круговорот влаги, формирование которого определяется взаимодействием теплового режима и циркуляции атмосферы, процессов испарения (включая эвапотранспирацию), переноса и фазовых преобразований воды в атмосфере, причем атмосферная циркуляция интерактивно связана с радиационным режимом, подверженным воздействию антропогенно обусловленных вариаций состава атмосферы (в том числе химически и биологически активных компонентов). К числу главных трудностей решения проблемы влагооборота принадлежат недостаточная надежность оценок эвапотранспирации на суше, испарения и осадков на океанах, неадекватность описания процессов образования облаков и выпадения осадков. Требуется, в частности, дальнейшего изучения роль растительного покрова в переносе воды из почвы в атмосферу. Все еще фрагментарны данные по глобальной климатологии облачного покрова, распределению осадков над океанами и испарению с поверхности океана.

Ведущая роль океана в формировании глобального влагооборота и климата определяет ключевое значение проблемы взаимодействия между атмосферой и океаном и в этой связи программы „Разрезы” [35, 39]. Крайне недостаточно исследовано также взаимодействие между атмосферой и поверхностью суши (именно это определило созыв в 1982 г. международной конференции „Параметризация процессов на поверхности суши” и разработку международной программы спутниковых исследований процессов на поверхности суши).

Фундаментальное климатообразующее значение имеет снежный и ледяной покров и его изменчивость. Высокое альбедо снега и льда определяет сильную (интерактивную) зависимость климата от вариаций протяженности, а также свойств снежного и ледяного покрова. Морские льды играют важную роль как теплоизолирующая прослойка (это определяет большой вклад теплообмена через полыньи и разводья в высоких широтах), как теплоинерционный компонент, трансформирующий годовой ход температуры путем сдвига экстремумов за счет выделения скрытого тепла замерзания осенью и затрат на таяние весной. Будучи чувствительным компонентом климатической системы, ледяной покров оказывается полезным индикатором изменений климата.

Принципиальной важности факт состоит в том, что континентальная биомасса оценена лишь с точностью до коэффициента порядка

двух, а изменения в масштабах времени порядка десятилетий известны еще хуже. Подобная ситуация осложняется крупномасштабностью воздействия хозяйственной деятельности человека на природные экосистемы за последние 100 лет (вырубка лесов, широкое применение инокультур в сельском хозяйстве и др.). Необходимы значительно более точные оценки суммарной биомассы для отдельных экосистем и для поверхности суши в целом, которые сделают возможным более надежный анализ влияния изменений в землепользовании, климате и поступлении питательных компонентов на глобальную первичную биопродуктивность. К числу приоритетных относятся исследования: 1) влияния поступления биогенных компонентов (в частности, азота, фосфора и серы), изменения концентрации оксидантов, выпадения кислотных осадков и тяжелых металлов на резервуары углерода; 2) обратной реакции биоты на изменения в окружающей среде; 3) факторов, регулирующих соотношение углерода между живыми и отмершими компонентами экосистем, и их зависимости от антропогенных воздействий.

2.2. Оптимизация глобальной системы наблюдений

Решение упомянутых выше задач требует создания глобальной системы наблюдений с использованием как обычных, так и спутниковых средств наблюдений при несомненном приоритете последних. Следует, конечно, прежде всего проанализировать адекватность существующих наблюдательных средств с точки зрения проблематики МГБП, поскольку сразу ясно, что многие потребности в информации о геосфере–биосфере могут быть удовлетворены (полностью или частично) уже сейчас с использованием таких средств наблюдений, как метеорологические и природно-ресурсные спутники, а также пилотируемые орбитальные станции. Столь же очевидно, что вся совокупность требований к данным наблюдений может быть реализована лишь путем совершенствования, расширения и дополнения существующих средств наблюдений. Это означает прежде всего необходимость планирования адекватной и оптимальной глобальной системы наблюдений [30].

Актуальность проблемы оптимального планирования систем дистанционного зондирования из космоса определяется целым рядом причин, включающих высокую стоимость проведения космических экспериментов, ограничения на вес аппаратуры, мощности источников питания и объем накапливаемой на борту информации. Кроме того, необходимо иметь в виду ряд научных аспектов проблемы. Интерпретация данных спутниковых наблюдений связана с решением математически некорректных обратных задач: по характеристикам отраженной или поглощенной радиации необходимо восстанавливать параметры, характеризующие состояние природной среды. Некоррект-

ность большинства обратных задач дистанционного зондирования является причиной того, что выбор условий измерений критически влияет на точность получаемого результата [30]. Поэтому неудачный выбор спектральных каналов или геометрии измерений может в значительной мере обесценить результаты эксперимента. С другой стороны, пренебрежение исследованиями информационного содержания данных дистанционных измерений может привести к получению избыточной информации.

Близость требований к системам дистанционной индикации объектов, которые представляют интерес для самых различных применений, явилась причиной постановки вопроса о планировании космических систем многоцелевого назначения. Ниже будут обсуждаться две основные стратегии в подходе к задачам оптимального планирования космических систем дистанционного зондирования [30].

Экономическая стратегия оптимального планирования систем дистанционного зондирования основана на максимизации интегрального показателя экономической эффективности многоцелевой наблюдательной системы V при условии, что индивидуальные эффективности для отдельных задач v_i ($i = 1, \dots, N$) регламентированы специальными ограничениями типа неравенств сверху и снизу. Одним из наиболее эффективных численных алгоритмов решения рассматриваемой задачи является метод Балаша, который был использован для расчетов по планированию многоцелевых систем дистанционной индикации объектов природной среды из космоса. Все задачи разделены на четыре большие группы: океанология, гидрология, геология, лесное и сельское хозяйство. Каждая из упомянутых групп в свою очередь подразделяется на подгруппы. Число частных задач, входящих в каждую из основных групп, колеблется от 9 до 14. Приведем в качестве примера перечень частных задач группы „океанология”, представляющих оптимальную совокупность спектральных каналов зондирования для многоцелевой съемки: 1) состояние поверхности моря; 2) мутность вод; 3) морские льды; 4) общие близбереговые морские съемки; 5) картирование прибрежных течений и приливов; 6) глобальное картирование течений, съемки поверхности океана; 7) картирование береговой линии и отмелей; 8) батиметрия и топография льда; 9) распространение и миграция морских организмов; 10) прибрежные загрязнения воды; 11) воздействие загрязнений на морскую среду; 12) изучение баров, рифов и др.

Общее число спектральных каналов зондирования для 12 задач ($N = 12$), входящих в группу „океанология”, составляет 37 ($M = 37$). При этом число элементарных спектральных интервалов m_i , входящих в требования для i -й частной задачи, находится в пределах $18 \leq m_i \leq 33$. Это означает, что объем информации для каждой из частных задач достаточно велик. Он составляет не менее половины от всего объема информации для группы задач „океанология”.

Вычисления показателей экономической эффективности измерительных каналов K_j ($j = 1, \dots, N$) показали, что некоторые спектральные

области являются потенциально убыточными (отрицательные значения K_j) с точки зрения многоцелевого назначения системы наблюдений. К их числу относятся каналы (спектральные интервалы) 0.40–0.45 и 0.69–0.73 мкм.

Наиболее экономически оправданы измерения в спектральных каналах 0.53–0.55, 0.66–0.69, 0.59–0.61, 0.61–0.64 и 0.55–0.57 мкм. Здесь достигаются максимальные значения $\{K_j\}$. Таким образом, даже довольно простые расчеты позволяют выделить из большого начального перечня спектральных каналов зондирования наиболее существенные с точки зрения экономических критериев. Аналогичным образом можно рассмотреть другие группы задач и характеристики наблюдательной системы (пространственно-временное разрешение, периодичность, геометрия и т. п.).

Стратегия многоцелевого планирования космической системы дистанционного зондирования основана на применении статистических методов обработки данных наблюдений. Математическая формализация требований может быть осуществлена достаточно просто [30]. Рассмотрим в качестве примера задачу выбора спектральных интервалов. Совокупность интервалов, рекомендуемых для реализации частных задач, образует множество на спектральной оси. Произведя пересечение всех интервалов, получим совокупность элементарных интервалов, образующих базис для построения любого интервала из исходной совокупности. Образует вектор с числом компонентов n , равным числу элементарных интервалов. Для j -й частной задачи поставим в соответствие индикаторный вектор x^j , i -й компонент которого принимает значения нуля или единицы в зависимости от того, входит или не входит i -й элементарный интервал в требования, предъявляемые j -й частной задачей.

Имея в распоряжении набор вектор-требований $X = \{x^j\}$, можно поставить задачу нахождения вектора x^* , минимизирующего (максимизирующего) некоторый целевой функционал V , определяемый набором X . Дальнейший ход решения задачи может быть осуществлен двумя путями. Если рассматривать совокупность векторов $X = \{x^j\}$ как статистическую выборку, то задача многоцелевого планирования может быть сформулирована как задача стохастической оптимизации, а для ее решения могут быть применены методы главных компонентов и факторного анализа.

Основная идея факторного анализа сводится к тому, что наблюдаемые корреляции среди компонентов вектора X обусловлены существованием небольшого числа независимых скрытых переменных y_l ($l = 1, \dots, m$), причем $m \ll n$. Запишем соответствующее представление

$$x^j = \sum_{l=1}^m f_{jl} y_l + \delta_j, \quad (2.1)$$

в котором случайный вектор δ_j ($\delta_1, \dots, \delta_n$) характеризует невязку. Элементы вектор-столбцов, образующих матрицу факторных нагрузок

$F = \{f_{il}\}$, дают представление о тех компонентах исходного вектора X , которые существенны с точки зрения информативности проводимых измерений. В спектральной задаче цель анализа состоит в выделении наиболее информативных спектральных интервалов. На практике целесообразно добиваться выделения на спектральной оси односвязных множеств. Сначала столбцы F находятся методом главных компонент, но их компоненты могут и не отвечать указанным условиям. Для достижения поставленной цели можно использовать то, что соотношение (2.1) и статистические свойства остаются инвариантными по отношению к преобразованию $\tilde{y} = Uy$, $\tilde{F} = FU^T$ с ортогональной матрицей U . Метод варимаксных вращений позволяет найти преобразование, для которого реализуется экстремум функционала

$$V(\tilde{F}) = \sum_{l=1}^m \left\{ n \sum_{j=1}^n (\tilde{f}_{jl}^2 / \tilde{f}_j^2) - \left[\sum_{j=1}^n (\tilde{f}_j^2) \right]^2 \right\} \quad (\tilde{f}_j^2 = \sum_{j=1}^m \tilde{f}_{jl}^2),$$

характеризующего среднюю степень неоднородности вектор-столбцов факторных нагрузок. Величина $V(\tilde{F})$ называется вариацией матрицы.

2.2.1. Выбор спектральных интервалов

С помощью описанной процедуры можно выделить односвязные спектральные области для многоцелевой съемки, проводимой в интересах следующих четырех групп задач: I – океанология, II – гидрология, III – геология, IV – лесное и сельское хозяйство. Количество частных требований в группах составило: I – 102, II – 33, III – 36, IV – 32. При численном решении удается выделить 7–9 факторов для каждой группы задач. Первые четыре спектральных интервала обеспечивают 70-процентное покрытие дисперсии начальной невязки в пространстве требований. Во всех случаях выбираются два интервала: 0.73–0.8 и 0.9–1.1 мкм – и два интервала в видимой части спектра: 0.55–0.58 и 0.66–0.69 мкм. Остальные интервалы меняются в зависимости от группы задач.

Таблица 2.1
Оптимальный выбор спектральных каналов
для дистанционного зондирования

Группа задач	Спектральные интервалы, мкм				
	1	2	3	4	5
I	0.83–0.87	0.94–1.1	0.75–0.78	0.66–0.69	0.54–0.56
II–IV	0.94–1.1	1.20–1.25	0.51–0.57	0.66–0.69	0.40–0.49
I–IV	0.83–0.87	0.84–1.1	1.20–1.25	0.52–0.57	0.66–0.69

Следующим шагом является объединение названных групп задач в комплексы. С учетом исключения полос поглощения O_2 , H_2O , O_3 , NO_2 в табл. 2.1 приведены границы оптимальных спектральных интервалов для группы задач „океанология”, а также комплексов сухопутных задач и объединенной совокупности задач четырех рассматриваемых групп. Для достижения 70-процентного уровня покрытия дисперсии невязок в пространстве требований необходимо пять спектральных интервалов (три – в видимой, два – в ближней ИК-области спектра).

2.2.2. Оптимизация условий проведения космической съемки

Обсудим выбор параметров съемки, характеризующих геометрию эксперимента, а также пространственное и временное разрешение получаемой информации. Рассмотрим следующие параметры: высоту Солнца, максимальную высоту визирования, пространственное разрешение, обзорность съемки и максимальную периодичность. Общее число требований, выдвигаемых частными задачами по этой совокупности параметров, составило 73 [30]. Для каждого из пяти параметров были выделены три типа требований: высокий, средний и низкий, – что заметно упростило интерпретацию результатов применения алгоритма факторного анализа (табл. 2.2). Полученные рекомендации по планированию также имеют три градации для значений параметров съемки.

Некоторое сходство требований к параметрам съемки наблюдается в океанологии и гидрологии. Высокие требования предъявляются к пространственному разрешению в гидрологии. Аналогичность требований обнаруживается в задачах геологии, лесного и сельского хозяйства, где различаются лишь значения обзорности съемки.

Таблица 2.2
Оптимизация условий съемки из космоса
при максимальном надирном угле визирования, равном 30° ,
и высоте Солнца 30

Параметр измерительной системы	Группа задач			
	I	II	III	IV
Пространственное разрешение, м	50–300	5–10	10–30	10–30
Обзорность, км	400–1000	200–400	400–1000	50–200
Максимальная периодичность, сут	1	1	3–20	2–20

Сопоставление результатов, полученных по проблеме оптимизации системы спектральных каналов зондирования, показывает, что наблюдается определенная согласованность. Каналы зондирования 0.52–0.57 и 0.66–0.69 мкм являются наиболее эффективными для целей задач океанологии с точки зрения обеих стратегий. Другие каналы, расположенные в близкой ИК-области спектра (0.83–0.87 и 0.94–1.10 мкм), оказываются важными лишь с точки зрения многоцелевого характера применения получаемой информации. Их экономическая эффективность примерно в 2 раза ниже, чем у отмеченных выше каналов оптического диапазона.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что разработанные методы позволяют на строгой математической основе обосновать оптимальные состав системы измерений и условия проведения эксперимента. Многоцелевое назначение наблюдательных систем обеспечивает наиболее широкую сферу использования полученных результатов. Предлагаемые методы планирования гарантируют достижение определенного экономического эффекта от функционирования космических систем дистанционного зондирования как в целом для народного хозяйства, так и для определенных его отраслей.

Подводя итоги, отметим, что с учетом усилий, предпринимаемых в рамках ряда специализированных программ, центральная задача МГБП должна состоять в изучении взаимодействия компонентов геосферы–биосферы при несомненном приоритете физических, химических и биологических процессов на суше и в океане.

Поскольку ключевой аспект МГБП – биогеохимические круговороты и их изменения в результате антропогенных воздействий, человек должен выступать в этой программе не только как источник преобразований геосферы–биосферы, но и как важный объект исследований (с точки зрения воздействия на него изменяющихся условий в геосфере и биосфере). В таком случае главная цель МГБП – анализ современного состояния взаимодействия человека и окружающей среды и соответствующие прогностические оценки.

2.3. Устойчивость биосферы как основа экологической безопасности*

2.3.1. Вводные замечания

Цель всех экологических исследований заключается в поиске путей обеспечения нормальных условий жизни людей настоящего и будущих поколений. Бессмысленно ставить вопрос о спасении природы и даже жизни на Земле, ставя под угрозу жизнь самого человека. Человек существует в окружающей среде, поэтому экологические

* В соавторстве с В. Г. Горшковым и С. Г. Шерманом [15].

исследования должны прежде всего обеспечить сохранение пригодной для жизни человека окружающей среды.

Если окажется, что изменения окружающей среды определяются главным образом неправильным ведением хозяйства, то экологическая проблема превратится в проблему выяснения возможностей построения хозяйства, не изменяющего окружающей среды. Вопросы охраны природы и сохранения диких видов животных и растений в этом случае будут иметь второстепенное значение, связанное в основном с удовлетворением эстетических вкусов человека. Сохранение уникального генофонда диких видов в естественных условиях, а также резерватах, зоопарках и генных банках приобретет чисто прикладное хозяйственное значение, не имеющее никакого отношения к экологической проблеме охраны окружающей среды. По-видимому, многие дикие виды могут выжить только при условии изъятия из хозяйственной деятельности не менее 30 % обитаемой поверхности суши. Однако в рассматриваемом случае человечество безусловно не пойдет на такую меру и соответствующие виды неизбежно вымрут, не вызвав особого беспокойства широкой общественности. Заповедники, расположенные на ничтожных по своей площади территориях, будут служить памятниками природы, пригодными для их исследования лишь узким кругом специалистов.

Если же окажется, что сообщества естественных видов биосферы полностью определяют и поддерживают состояние окружающей среды, в которой существует человек, то охрана природы, сохранение естественных сообществ всех диких видов и нахождение величины порога допустимых возмущений биосферы станет главной экологической проблемой. Перестройка хозяйства в направлении уменьшения загрязнений окружающей среды превратится во второстепенную локальную задачу, строго говоря, не имеющую отношения к экологии.

Ниже мы приведем ряд аргументов и количественных результатов, демонстрирующих невозможность сохранения устойчивой, пригодной для жизни человека окружающей среды при существующих сейчас тенденциях перестройки современной биосферы.

2.3.2. Биологическая регуляция окружающей среды

Что же такое окружающая среда, биота и биосфера? В естественной науке все фундаментальные понятия характеризуются своими измеримыми свойствами. Так как по мере развития науки знания об этих свойствах обогащаются, то меняется и определение фундаментальных понятий. Например, за последние 100 лет претерпели существенное изменение определения таких фундаментальных физических величин, как масса и энергия. Термин „биота” был введен для объединения двух понятий: фауны и флоры. Окружающая среда включает вещества и организмы биоты, с которыми взаимодействует заданный

живой организм. Под биосферой понимают биоту и окружающую среду в глобальных масштабах. В биосферу включается также и внешняя среда (например, верхние слои атмосферы), в которой нет живых организмов, но которая интенсивно перемешивается с окружающей биоту средой. Однако все подобные определения лишь намечают объект исследования. По мере накопления знаний все эти понятия наполняются новым содержанием, которое на современном уровне мы попытаемся вскрыть в дальнейшем.

Прежде всего, окружающая среда характеризуется концентрациями химических соединений, потребляемых живыми организмами. Для организмов, разлагающих органические вещества (бактерий, грибов, животных), важны величины концентраций органических веществ и кислорода в почве, воде, воздухе, для синтезирующих органические вещества растений — величины концентраций углекислого газа, определенных химических соединений азота, фосфора и многих других элементов, входящих в состав тел живых организмов. Возникает вопрос: являются ли концентрации этих соединений (называемых часто биогенами) в окружающей среде случайными для биоты величинами, сложившимися в результате абиогенных геохимических процессов, или же эти концентрации сформированы самой биотой и поддерживаются ею на оптимальном для жизни уровне?

В первом случае биота должна была непрерывно приспосабливаться к изменяющейся окружающей среде. Однако концентрации биогенов могут меняться за счет геохимических процессов на величины порядка 100 % за времена порядка 100 тысяч лет. Поэтому за время существования жизни, длящегося миллиарды лет, концентрации практически всех биогенов должны были измениться на несколько порядков величины и принять значения, при которых существование любой жизни невозможно. Так, при уменьшении концентрации углекислого газа и кислорода в 100 раз биота погибает. Температура земной поверхности при заданном потоке солнечного излучения определяется, как известно, концентрациями атмосферных газов, т. е. парами воды и двуокиси углерода, создающими парниковый эффект. Современная средняя приземная температура составляет 15 °С. Изменение этой величины примерно на порядок в ту или другую сторону также привело бы к гибели всей жизни. Отсюда следует практически однозначный вывод, что живые организмы не должны использовать вещества, концентрации которых не могут регулироваться биологически. Следовательно, такие вещества не следует и включать в понятие окружающей среды. Более того, биологически регулируемые концентрации веществ должны определять приемлемые для жизни значения таких характеристик окружающей среды, как температура, спектральный состав доходящего до поверхности Земли солнечного излучения, режим водных осадков на суше.

Естественно, биота не может изменять поток солнечной радиации за пределами атмосферы, скорость вращения Земли, величину прили-

вов и отливов, рельеф местности и вулканическую деятельность, которые также характеризуют окружающую среду. Однако неблагоприятные изменения и случайные флуктуации этих характеристик биота может компенсировать путем направленного изменения управляемых ею концентраций биогенов в окружающей среде, аналогично действию принципа Ле Шателье в физических и химических устойчивых состояниях.

Конечно, можно встать на позицию признания реальности биологической регуляции окружающей среды только в том случае, когда все элементы этой регуляции будут выяснены детально. Однако очевидно, что в силу чрезвычайной сложности взаимодействия биоты с окружающей средой этого никогда не произойдет, так же как никогда не будут полностью изучены все виды живых организмов биосферы. Поэтому мы попытаемся обосновать наличие биологической регуляции окружающей среды (выполнение принципа Ле Шателье в биосфере) с разных точек зрения на основе существующего эмпирического материала.

2.3.3. Механизмы биологической регуляции окружающей среды

Воздействие биоты на окружающую среду сводится к синтезу органических веществ из неорганических, разложению органических веществ на неорганические составляющие и соответственно к изменению соотношения между запасами органических и неорганических веществ в биосфере. Скорость синтеза органических веществ определяет продукцию, а скорость их разложения — деструкцию. Так как органические вещества, входящие в состав живых организмов, имеют относительно постоянное соотношение химических элементов, то большей частью продукцию и деструкцию измеряют в единицах массы органического углерода, синтезируемого или разлагаемого в единицу времени. В среднем при синтезе 1 г органического углерода поглощается (а при разложении выделяется) 42 кДж. Поэтому продукция или деструкция 1 т органического углерода в год (1 т С/год) соответствует поглощению или выделению энергии мощностью 1.3 кВт. В дальнейшем мы будем использовать и массовые, и энергетические единицы измерения. Под мощностью биоты будем понимать ее продукцию, измеренную в энергетических единицах.

Очевидно, что биота способна создавать локальные концентрации биогенов в окружающей ее среде, отличающиеся на величины порядка 100 % и более от концентраций во внешней среде (где живые организмы не функционируют) только в том случае, когда потоки синтеза и разложения органических веществ, приходящиеся на единицу земной поверхности (называемые продуктивностью и деструктивностью), превосходят физические потоки переноса биогенов. Такая ситуация

имеет место в почве, где физические потоки диффузного расплывания биогенов значительно меньше биологической продуктивности. Поэтому почва обогащена органическими веществами и необходимыми для растений неорганическими соединениями по сравнению с нижележащими слоями земной поверхности, где живые организмы отсутствуют. Следовательно, локальные концентрации биогенов в почве регулируются биологически.

Концентрации всех растворенных неорганических соединений биогенов в открытом океане изменяются в несколько раз от поверхности океана до глубин порядка сотен метров. Концентрации С, N и P увеличиваются с нарастанием глубины, а концентрация O_2 уменьшается. Это связано с тем, что фотосинтез органических веществ происходит в поверхностном слое воды, куда проникает свет. Разложение же органических веществ может происходить на любой глубине. В результате средние глубины, на которых происходит синтез и разложение, различаются. В зоне синтеза у поверхности океана образуются органические вещества, которые погружаются в глубину и разлагаются на неорганические составляющие в зоне окисления, отстоящей от зоны синтеза на сотни метров. Обратный поток неорганических соединений обеспечивается диффузией при наличии разности их концентраций между глубинными и поверхностными водами. Кислород диффундирует с поверхности в зону окисления, а С, N и P диффундируют из зоны окисления в зону синтеза. Время перемешивания газов между атмосферой и слоем океана, в котором наблюдается градиент концентраций биогенов, составляет несколько десятков лет.

Концентрация растворенного углекислого газа (CO_2) в глубине в несколько раз выше, чем у поверхности. Поверхностная же концентрация CO_2 находится в равновесии с атмосферой. При прекращении жизни в океане все концентрации в глубинах и у поверхности сравниваются. При этом концентрация CO_2 в поверхностном слое и в атмосфере увеличится в несколько раз. (Сохранится разность концентраций CO_2 порядка 30 %, связанная с наличием градиента температур в океане, которая в десятки раз меньше поддерживаемой жизнью разности концентраций CO_2 . Запас растворенного неорганического углерода в океане в виде бикарбонатных ионов, находящихся в химическом равновесии с растворенным CO_2 , почти на 2 порядка больше, чем в атмосфере. Поэтому увеличение в несколько раз атмосферной концентрации углерода не изменит концентрацию неорганического углерода в глубине океана). Это может привести к катастрофическим изменениям парникового эффекта и климата в течение времени порядка десятков лет. Следовательно, биота океана удерживает атмосферную концентрацию CO_2 и сохраняет приземную температуру на приемлемом для жизни уровне.

Если физические потоки переноса биогенов в сотни раз превосходят биологическую продуктивность, то за счет деятельности живых

организмов концентрации биогенов в окружающей среде могут лишь на доли процентов отличаться от их концентраций во внешней среде. Однако если при таком изменении концентрации у биоты возникают ощутимые преимущества (другими словами, если эти изменения находятся в пределах разрешающей способности биоты), то они будут поддерживаться биотой в нужном ей направлении. Появившаяся разность концентраций вызовет физические потоки биогенов из внешней среды в окружающую или обратно. Такой поток будет существовать до тех пор, пока концентрации во внешней и окружающей среде не выравняются, т. е. концентрация биогена в обеих средах не достигнет оптимального для биоты значения. Таким образом, биота может регулировать глобальные концентрации биогенов во внешней среде, которая должна быть включена в понятие биосферы.

Например, избыток углекислого газа во внешней среде может быть переведен биотой в относительно мало активные органические формы. Наоборот, недостаток углекислого газа во внешней среде может быть дополнен за счет разложения этих органических запасов. Такие запасы органического вещества содержатся в гумусе почвы, торфе и растворенном органическом веществе океана (океаническом гумусе). В этих запасах сосредоточено более 90 % всего органического вещества биосферы. С помощью этих запасов органики, по-видимому, поддерживается постоянная концентрация не только углекислого газа, но и кислорода в атмосфере и океане. Как величину, так и направление изменения запасов органического вещества биосферы в глобальных масштабах до сих пор не удается непосредственно измерить с достаточной степенью достоверности. Они известны лишь по порядкам величин. Поэтому об их изменении можно судить только по косвенным измерениям, на которых мы остановимся ниже.

2.3.4. Функционирование принципа Ле Шателье в биосфере

Запасы органического (C^+) и неорганического (C^-) углерода в биосфере совпадают по порядку величины – это необходимое условие для возможности компенсации биотой практически любых изменений концентраций двуокиси углерода в атмосфере и океане, происходящих вследствие естественных возмущений. Отношение этих запасов к продуктивности глобальной биоты представляет собой время биологического оборота биогенного запаса биосферы, которое имеет порядок десятков лет. Следовательно, при наличии только синтеза органических веществ, в отсутствие их разложения весь неорганический углерод биосферы будет израсходован и переведен в органические соединения за десятки лет. Аналогично при наличии только разложения, в отсутствие синтеза весь органический углерод биосферы исчезнет за десятки лет.

С помощью измерения концентрации углерода в пузырьках воздуха ледовых кернов Антарктиды и Гренландии различного возраста установлено, что концентрация углерода в атмосфере оставалась постоянной в пределах погрешности измерений в течение последних нескольких тысяч лет. За времена порядка сотен тысяч лет концентрация углерода в атмосфере сохраняла порядок величины. Из этих данных однозначно следует, что глобальные среднегодовые потоки биологического синтеза и разложения органических веществ совпадают с точностью до четырех значащих цифр, т. е. компенсируют друг друга с относительной точностью порядка 10^{-4} .

Неорганический углерод выбрасывается в биосферу за счет процессов дегазации (вулканической деятельности, фильтрации из мантии) и откладывается в осадочные породы, выбывая из биосферы за счет процессов выветривания. Разность между выбросами и отложениями составляет чистый поток неорганического углерода в биосферу, который оказывается положительным и имеет тот же порядок величины, что и выбросы и отложения. Таким образом, выбросы и отложения неорганического углерода не компенсируют друг друга. Отношение современного запаса неорганического углерода в биосфере к его чистому геофизическому потоку имеет порядок ста тысяч лет, т. е. за время порядка миллиарда лет этот запас должен был возрасти в 10 тысяч раз, чего не произошло. Следовательно, существует компенсирующий процесс. Этим процессом является накопление органического углерода в осадочных породах. Прямое исследование накопления органического углерода показало, что запасы органического углерода, накопленные примерно за миллиард лет и дисперсно распределенные в осадочном слое толщиной порядка километра, действительно превосходят запасы и неорганического, и органического углерода в биосфере на 4 порядка.

Отсюда также однозначно следует, что чистый геофизический поток неорганического углерода в биосферу и поток захоронения органического углерода в осадочных породах (равный разности продукции и деструкции) в среднем совпали с точностью до четырех значащих цифр, т. е. с относительной точностью 10^{-4} .

Таким образом, естественная биота контролирует до восьми значащих цифр в величинах продукции и деструкции (четыре знака в величинах продукции и деструкции совпадают, остающиеся четыре знака в разности продукции и деструкции совпадают с четырьмя знаками величины чистого геофизического потока), т. е. разрешающая способность естественной биоты исключительно высока, ибо случайное совпадение величин с такой точностью невероятно.

Количество кислорода в биосфере на 3 порядка превосходит количество кислорода, необходимое для разложения всего органического углерода биосферы. Это связано с тем, что при синтезе органического углерода, захороненного в осадочных породах, высвобождающийся при этом кислород не оставался в осадочных породах, а посту-

пал в свободном виде в биосферу. (Кислорода должно было выделиться в 10 раз больше того количества, которое присутствует сейчас в биосфере. По-видимому, значительная часть выделившегося кислорода израсходовалась на окисление вулканических выбросов). Продолжающийся процесс захоронения органического углерода в осадочных породах, поток которого составляет десятитысячную часть биологической продукции в биосфере, обеспечивает постоянство концентраций кислорода и углекислого газа в биосфере.

Захороненный в осадочных породах органический углерод навсегда выбыл из биологического круговорота и, следовательно, не должен включаться в понятие биосферы. Эти запасы остаются неприкосновенными для всей естественной биоты. Человек начал использовать ископаемое топливо, существующее в виде концентрированных месторождений угля, нефти, природного газа, которые содержат тысячную часть величины общего органического углерода осадочных пород.

Таким образом, имеющиеся данные свидетельствуют в пользу биологической регуляции концентрации веществ в биосфере. Естественная биота Земли устроена так, что способна с высочайшей точностью поддерживать пригодное для жизни состояние окружающей среды. Возникает вопрос: зачем биота развивает такую огромную величину биологической продукции? Ведь для того чтобы компенсировать неблагоприятные геофизические процессы, казалось бы, достаточно иметь на 4 порядка меньшую продукцию биоты. Однако геофизические процессы непостоянны. Они претерпевают большие флуктуации, типа катастрофических извержений вулканов, падения крупных метеоритов и проч. Если бы биота медленно восстанавливала нормальное состояние окружающей среды, то многие виды вынуждены были бы длительное время существовать в неестественных условиях. Такое положение могло бы привести к быстрому вымиранию видов и разрушению способности биоты компенсировать возмущения окружающей среды. Огромная мощность продукции, достигнутая биотой, позволяет ей восстанавливать любые естественные нарушения окружающей среды в кратчайшие сроки, меньшие десятков лет. Такие непродолжительные времена нарушения окружающей среды безопасны для любых видов живых организмов.

2.3.5. Нарушение принципа Ле Шателье в современной биосфере

Огромная мощность, развиваемая биотой Земли, в то же время сама таит в себе скрытую опасность быстрого разрушения окружающей среды. Если целостность биоты будет нарушена, то окружающая среда может полностью исказиться за десятки лет. Если же вся биота будет уничтожена, то окружающая среда сможет исказиться за счет геофизических процессов только за сотни тысяч лет. Поэтому наруше-

ние структуры естественной биоты на основе преобразования природы представляет собой для окружающей среды в 10 тысяч раз большую опасность, чем уничтожение биоты.

В настоящее время хорошо известно, что концентрация углекислого газа в атмосфере быстро увеличивается. Это усиливает парниковый эффект и может привести к росту приземной температуры. Увеличение содержания углекислого газа в атмосфере долгое время связывали только со сжиганием ископаемого топлива (угля, нефти, газа). Кроме того, естественно было ожидать, что биота суши и океана реагирует на это увеличение в соответствии с принципом Ле Шателье, поглощая избыточный углекислый газ из атмосферы.

Однако глобальный анализ землепользования указывает на то, что в континентальной части биосферы количество органического углерода не увеличивается, а уменьшается, причем скорость выбросов углерода в атмосферу из континентальной биоты (включая органические запасы почвы) совпадает по порядку величины со скоростью выбросов ископаемого углерода от сжигания угля, нефти и газа. Следовательно, континентальная биота нарушает принцип Ле Шателье. Низкая достоверность прямых оценок скорости сокращения содержания органического углерода биосферы на суше вызвала многочисленные попытки получить те же результаты другим способом.

Можно, например, использовать данные об изменении относительного содержания редких изотопов углерода ^{13}C и ^{14}C в модельно независимых расчетах, основанных на теории возмущения и законе сохранения вещества. Биота может реагировать только на изменение содержания основного изотопа ^{12}C в окружающей среде. Концентрации редких изотопов устанавливаются за счет физико-химических процессов. С помощью этого метода удается показать, что биота океана продолжает подчиняться принципу Ле Шателье. Океан поглощает сейчас более 4 Гт С/год, из них более 2 Гт С/год поглощает биота океана. В атмосфере накапливается 3.5 Гт С/год. Ископаемый углерод выбрасывается в атмосферу со скоростью 5 Гт С/год. Две последние скорости измеряются непосредственно. Изменение содержания углерода происходит только в четырех средах: атмосфере, ископаемом топливе, океане и наземной части биосферы. Отсюда из закона сохранения вещества получаем, что континентальная часть биосферы теряет углерод со скоростью 2.5 Гт С/год.

Принцип Ле Шателье, характеризующий устойчивость системы, выражается в том, что скорость поглощения углерода биотой (при малых относительных возмущениях окружающей среды) пропорциональна приросту концентрации углерода в окружающей среде по отношению к невозмущенному, доиндустриальному состоянию. При выполнении принципа Ле Шателье коэффициент пропорциональности должен быть положительным. Анализ скорости выбросов ископаемого углерода и накопления углерода в атмосфере позволяет установить поведение этого коэффициента для континентальной биоты во

времени. В течение прошлого столетия биота суши подчинялась принципу Ле Шателье, т. е. была слабо возмущена человеком. В это время биота Земли эффективно компенсировала все воздействия человека на биосферу и проблемы загрязнения окружающей среды не возникало.

С начала нашего столетия биота суши перестала поглощать избыток углерода из атмосферы. Наоборот, она начала выбрасывать углерод в атмосферу, увеличивая, а не уменьшая загрязнение окружающей среды, производимое промышленными предприятиями. Это означает, что структура естественной биоты суши оказалась нарушенной в глобальных масштабах. Учитывая, что вся хозяйственная деятельность человека направлена на преобразование биосферы, можно оценить порог антропогенного воздействия, начиная с которого принцип Ле Шателье перестает действовать, т. е. биота и окружающая ее среда теряют устойчивость. В доиндустриальную эпоху площади эксплуатируемых земель составляли менее 5 % территории суши, на которых человек использовал не более 20 % продукции биоты. В результате общая антропогенная доля потребления продукции биосферы не превышала 1 %. Современная доля антропогенного потребления продукции биосферы почти на порядок больше этого значения. Ниже будет дано более детальное обоснование этой оценки с разных точек зрения.

Здесь подчеркнем лишь следующее. Из имеющихся оценок следует, что, с одной стороны, порог допустимого воздействия на биосферу заведомо намного меньше современной доли потребления человеком, т. е. величины порядка 10 %. С другой стороны, биосфера, по-видимому, может компенсировать любые возмущения, производимые человечеством, доля потребления которого не превышает 1 % продукции биосферы. При этом неважно, занимает ли человечество 1 % территории суши, на которой полностью искажает естественную биоту, или же оно освоило 10 % территории суши, на которой искажение естественной биоты не превосходит 10 %. Биосфера в течение тысячелетий могла поддерживать человечество, не знавшее, что такое охрана окружающей среды, которое освоило всю Европу и значительную часть Азии.

Теперь можно уточнить понятия биоты и биосферы. Под биотой следует понимать такие естественные сообщества организмов фауны и флоры, которые способны подчиняться принципу Ле Шателье и компенсировать все возникающие возмущения окружающей среды. Домашние животные и культурные растения, выращиваемые человеком, а также приусадебные участки, сады и парки, которые не обладают внутренней устойчивостью, не должны включаться в понятие биоты. Под биосферой следует понимать такое состояние биоты, окружающей ее и взаимодействующей с ней внешней среды (см. выше), в которой антропогенное возмущение находится ниже порога нарушения действия принципа Ле Шателье. Нет сомнения в том, что при продолжающихся тенденциях освоения природы естественная биота

будет полностью уничтожена. Остается, однако, важнейший вопрос: может ли восстанавливаться биосфера после существенного сокращения современного антропогенного возмущения? На основе анализа структуры биосферы, проведенного в следующих разделах, на этот вопрос можно дать пока положительный ответ.

2.3.6. Биосфера как „свободный рынок”

Каким же образом функционирует естественная биота и как достигается высокая точность контроля за изменением величин синтеза и разложения органических веществ в биосфере? Основным принципом, определяющим функционирование жизни на любых уровнях, – это конкурентное взаимодействие автономных, не скоррелированных между собой особей. Это тот же принцип, который лежит в основе свободного рынка. Хорошо известно, что точность, с которой происходит фиксация цен на свободном рынке, очень высока. Никакие расчеты на основе математических моделей и современной компьютерной техники не могут достигнуть этой точности и заменить собой рынок. Отказ от свободного рынка приводит к потере точности и росту непроизводительных расходов. Рынок не придуман человеком. Он может существовать потому, что в основе его лежат действия живых людей – членов человеческой популяции. Современные рынки – это лишь приспособление основных принципов жизни к существующей культуре и цивилизации человечества. Как же выглядит „свободный рынок” в биосфере?

Любые живые особи представляют собой сложнейшие виды скоррелированности на молекулярном, клеточном, организменном и социальном уровнях. Главной особенностью жизни является то, что в силу чрезвычайной сложности корреляционных связей любой конкретный вид скоррелированности в биоте всегда является неустойчивым и распадается с течением времени. Для организма этот распад соответствует смерти. В последовательном ряду потомков одной особи происходит неизбежное, экспериментально подтвержденное накопление распадных изменений наследственной программы. Относительное число распадных особей в потомстве нормальной особи является количественной видовой характеристикой. Например, из каждых 700 новорожденных у человека один страдает тяжелым генетическим нарушением – синдромом Дауна. Сохранение существующих типов скоррелированности живых особей возможно только в рамках популяций этих особей.

Большинство распадных особей способно размножаться не менее интенсивно, чем нормальные особи. Для сохранения уровня организации популяции все распадные особи должны либо устраняться от размножения, либо тем или иным способом исключаться из популяции. Это может быть обеспечено только нормальными особями,

имеющими наибольшую конкурентоспособность в естественных для вида условиях, так как программа удаления распадных особей из популяции также может подвергнуться распаду. Выявление распадных особей и устранение их из популяции осуществляется в процессе конкурентного взаимодействия всех особей. Конкурентоспособность определяется эффективностью использования естественных для вида условий окружающей среды.

С отклонением внешних условий от естественных, т. е. выходом популяции из ее экологической ниши, конкурентоспособности нормальных и распадных особей выравниваются. Исчезают критерии отличия нормальных особей от распадных. В эти периоды в силу непрекращающихся процессов распада относительное число распадных особей (т. е. генетическое разнообразие популяции) экспоненциально возрастает. Доля нормальных особей уменьшается. Однако с возвратом к внешним условиям естественной экологической ниши максимальная конкурентоспособность нормальных особей восстанавливается и они вытесняют распадных особей из популяции. Именно для этого требуется быстрая компенсация возмущения внешних условий, обеспечиваемая огромной величиной продуктивности биоты. Отметим, что в стационарном состоянии распадные особи всегда присутствуют, но их частота встречаемости в естественных условиях мала.

Устойчивой является только популяция конкурентно-взаимодействующих особей. При выключенном конкурентном взаимодействии популяция вырождается в несколько изолированных последовательностей потомков разных особей. В силу продолжающегося процесса распада происходит накопление распадных особей и в конечном счете неизбежное вырождение и вымирание вида.

Сложное скоррелированное взаимодействие различных особей в социальных структурах поддерживается за счет конкурентного взаимодействия различных социальных структур. Для общественных насекомых типа муравьев — это конкурентное взаимодействие между различными муравейниками в популяции муравейников. Совершенно так же скоррелированное взаимодействие особей различных видов в сообществе может поддерживаться конкурентным взаимодействием различных (но одинаковых по видовому составу) сообществ. Простейшим типом сообществ является лишайник, состоящий из скоррелированных друг с другом водоросли и гриба. Поддержание этого типа скоррелированности обеспечивается конкурентным взаимодействием различных лишайников в популяции соответствующего вида лишайника. Скоррелированное образование различных организмов типа муравейника, лишайника или любого сообщества организмов различных видов можно рассматривать как обобщение понятия особи.

Очевидно, что стабилизация существующего типа внутренней скоррелированности живых особей в популяции на основе их конкурентного взаимодействия и отбора выполняема, только если все особи внутри популяции являются совершенно независимыми и не скорре-

лированными между собой. В противном случае вытеснение распавшейся особи из популяции было бы невозможным, как невозможно вытеснение большого органа из организма. Отсюда следует также, что поддержание внутренней скоррелированности живых особей в популяции принципиально не может обеспечиваться за счет централизованного управления всей популяцией.

2.3.7. Сообщества биосферы

Наиболее сложным видом скоррелированности среди живых объектов – обобщенных особей – является скоррелированность организмов различных видов в сообществах. Именно этот вид скоррелированности обеспечивает выполнение принципа Ле Шателье в биоте по отношению к внешним возмущениям окружающей среды. Возникновение сообществ связано только с необходимостью замкнутости круговоротов веществ. В условиях, когда искусственно подаются необходимые питательные вещества и удаляются отходы, сообщества распадутся.

Например, городские воробьи поддерживают видовую устойчивость в течение тысячелетий вне их естественных сообществ, в которые они когда-то входили. Появление наряду с воробьями еще и голубей не приводит к возникновению сообщества. То же относится ко всем видам домашних животных и культурных растений.

Сложность строения отдельных организмов в естественных сообществах и видовое разнообразие состава сообщества служат единственной цели – поддержанию его максимальной конкурентоспособности. Совершенно аналогично конкретным организмам каждое конкретное сообщество имеет конечные размеры и распадается с течением времени. Распад заключается в потере способности поддерживать стабильные условия окружающей среды с высокой точностью. Это приводит к утрате конкурентоспособности сообществом и его вытеснению непрерывно образующимися новыми сообществами. Все известные способы стабилизации уровня организации особей основаны на существовании конкурентного взаимодействия в рамках их популяций. Поэтому мы вынуждены предположить, что стабилизация уровня организации любых сообществ достигается тем же способом, т. е. всегда существует популяция однородных сообществ, которая и сохраняет устойчивость.

Численность сообществ в их популяции определяется размером отдельного сообщества. Размер отдельного сообщества ограничивается областью, в которой потоки синтеза и разложения органических веществ балансируются с максимальной точностью в нормальных условиях и, кроме того, достигает максимума биотическая регуляция отклонений от этого равенства при возмущениях окружающей среды. Чем меньше размер сообщества, тем жестче могут быть связаны входя-

щие в него организмы различных видов. С увеличением размера сообщества корреляционные межвидовые связи неизбежно затухают и сообщество постепенно теряет внутреннюю скоррелированность. Размер отдельного сообщества может быть оценен по характерной длине, на которой прекращается увеличение (т. е. происходит насыщение) видового разнообразия организмов, поглощающих главную часть потоков энергии. Эта длина для большинства сообществ не превосходит десятков метров. Быстрое вытеснение распавшихся сообществ приводит к кажущейся однородности всей популяции сообществ, занимающей большую площадь земной поверхности, которую обычно называют экосистемой.

Скоррелированность видов в сообществе может быть очень жесткой. Лишайник состоит из строго определенных видов водоросли и гриба. Некоторые виды насекомых могут питаться только единственным видом растений. Именно жесткая скоррелированность видов в сообществе обеспечивает широкую область возможных реакций сообщества на любые возможные флуктуации внешних условий. При нарушении скоррелированности область реакции сужается совершенно так же, как сужается область реакции изолированных органов отдельного организма.

Уничтожение всей популяции сообществ необратимо так же, как необратимо уничтожение любого биологического вида. (Известными примерами необратимого уничтожения естественных сообществ является уничтожение степей и тропических лесов). После существенного нарушения значительной части сообществ, входящих в популяцию, происходит восстановление численности нормальных сообществ, обеспечивающих замкнутость круговорота веществ и устойчивость окружающей среды.

Количественно степень замкнутости круговорота веществ можно характеризовать величиной разомкнутости, равной разности потоков синтеза и разложения, деленной на поток синтеза. Как было показано выше, в естественных условиях эта величина имеет порядок 10^{-4} , т. е. сотой доли процента. Для того чтобы потоки синтеза и разложения совпали с такой высокой точностью, необходимо, чтобы случайные относительные флуктуации этих потоков не превосходили величину разомкнутости. Малость флуктуаций в сообществах, состоящих из конкурентно-взаимодействующих особей, может обеспечиваться только статистическим законом больших чисел, согласно которому относительная флуктуация пропорциональна $1/\sqrt{N}$, где N — число не скоррелированных между собой частей системы. Следовательно, отдельно и синтез, и разложение в сообществе должны производиться большим числом независимых частей.

Основную продукцию органических веществ во многих экосистемах дают крупные растения. Однако неподвижные растения имеют чрезвычайно низкую внутреннюю скоррелированность. Крупное растение образует хаотическое распределение листвы, ветвей и корней

и функционирует эквивалентно набору нескоррелированных мелких водорослей. Это обеспечивает малость флуктуаций продуктивности биоты. Аналогично происходит уменьшение флуктуации деструктивности при разложении органических веществ бактериями и грибами.

Крупные животные должны передвигаться и имеют жестко скоррелированные тела. Единственным способом уменьшения флуктуации разложения органических веществ при включении в экосистемы крупных животных является уменьшение доли потребления ими продукции растений. Поддерживание низкой доли потребления биологической продукции крупными животными, кормовые территории которых включают множество отдельных сообществ, происходит так же, как биологическая регуляция концентрации биогенов во внешней среде. Распадные изменения в этих сообществах или в поведении крупного животного, позволяющие ему увеличивать свою долю потребления сверх допустимых уровней, приводят к искажению окружающей среды, потере конкурентоспособности такими сообществами и их вытеснению сохранившимися нормальными сообществами. Если нормальные сообщества не сохраняются, то окружающая среда разрушается.

Отсюда мы получаем еще одну характеристику биосферы: средний радиус скоррелированности организмов биоты, по-видимому, не превосходит размеров одноклеточных.

Аналогичное явление характеризует сообщества открытого океана. Вся органическая продукция этих сообществ производится водорослями в поверхностном слое воды, куда проникает солнечный свет. Основная часть организмов, разлагающих органические вещества, жестко скоррелирована с водорослями и сосредоточена также в поверхностном слое. Эти сообщества обеспечивают замкнутость круговорота веществ с высокой точностью, но все же ниже фоновой. Небольшая часть органических веществ (от одной сотой до одной тысячной) опускается на дно. Здесь донные организмы, отделенные от поверхностных сообществ километровыми толщами воды, доводят замкнутость круговорота веществ до наблюдаемого фонового уровня. Результаты деятельности донных организмов одинаковы для всех сообществ поверхностного слоя. Поэтому все популяции поверхностных сообществ океана контролирует состав и численность донных организмов так же, как биота биосферы контролирует численность крупных животных и концентрации биогенов во внешней среде.

В подвергающихся непрерывному возмущению культурных агроценозах разомкнутость, как можно убедиться путем непосредственных оценок, всегда выше десятков процентов. В то же время после прекращения возмущения (после сплошной рубки лесов, пожаров и стихийных бедствий), как следует из измерений продуктивности, прироста биомассы и изменения концентрации неорганических веществ в почве, разомкнутость быстро опускается до нескольких процентов в течение десятков лет. При этом происходит возникновение конку-

рентно-взаимодействующих сообществ и непрерывное сокращение их размера. Однако выход на фоновый уровень разомкнутости порядка сотых долей процента и образование естественных сообществ с минимальными размерами происходит за сотни лет после многократных смен растительного покрова и появления естественного возрастного распределения растительности. Последнее можно установить только путем сравнения возмущенных и девственных участков биосферы. Если значительная часть популяции сообществ подвергается разрушению чаще, чем раз в несколько сотен лет, то фоновый уровень разомкнутости уже не достигается и начинается разрушение окружающей среды. Это следует из уже рассмотренного анализа глобального круговорота углерода.

2.3.8. Эволюция

Описанный способ стабилизации биоты и окружающей среды обеспечивает также и эволюцию биологических видов и их сообществ. Закрепиться в биосфере могут лишь виды, которые не приводят к уменьшению конкурентоспособности сообщества, т. е. уменьшению степени замкнутости круговоротов вещества. Палеоданные показывают, что эволюционный процесс был чрезвычайно медленным. Заметное изменение видового состава биосферы, т. е. переход биоты и окружающей ее среды из одного устойчивого состояния в другое, происходит на протяжении миллионов лет. В течение сотен и тысяч лет никакого развития биосферы и перехода биоты в новое устойчивое состояние произойти не может. Могут лишь наблюдаться процессы возврата к существующему в данный геологический период устойчивому состоянию после естественных внешних возмущений, не нарушающих устойчивости биосферы, или же процессы полного распада биосферы и жизни при возмущениях, превосходящих пределы ее устойчивости. Длительное существование жизни показывает, что подобных катастрофических возмущений биосферы не было за всю ее историю.

Направление эволюции всегда определяется ростом конкурентоспособности и вытеснением предшествующих менее конкурентоспособных форм жизни. Рост конкурентоспособности не всегда связан с увеличением организации (скоррелированности) живых объектов. Эволюция может идти в направлении разрушения достигнутой организации, роста агрессивной конкурентоспособности при утрате жизнеспособности, т. е. вытеснения более агрессивными и менее организованными особями более организованных, но менее агрессивных особей. Такой процесс мог бы привести к полной дезорганизации и в конечном итоге к исчезновению жизни.

В частности, это может происходить в результате увеличения размеров как живых организмов, так и их социальных структур и сообществ, которое, как правило, сопровождается ростом конкурентоспо-

способности. Рост размера приводит к уменьшению числа особей в популяции, в конечном итоге к полной скоррелированности всех частей популяции и прекращению конкурентного взаимодействия и отбора. Сокращение числа независимо функционирующих живых особей в сообществе нарушает действие закона больших чисел, что приводит к неограниченному росту флуктуаций синтеза и разложения органических веществ в сообществе и невозможности поддержания их в скоррелированном состоянии.

Длительность существования жизни и имеющиеся палеоданные указывают на то, что в природе существовали причины (во всяком случае до антропогенного возмущения биосферы), которые останавливали подобную эволюцию в направлении разрушения организации жизни. Причины эти лежат в отсутствии изобилия биогенов в биосфере. Изобилие соответствует ситуации, когда запас биогенов в биосфере намного больше их распада за все время произошедшей эволюции, или, другими словами, когда время эволюции намного меньше времени биологического оборота биогенов.

Время эволюции биосферы определяется временем смены видового состава биоты или, в предположении постоянства числа видов в биосфере, средней продолжительностью существования вида. Это время, как уже указывалось, согласно палеоданным, имеет порядок миллиона лет. Время биологического оборота биогенов равно отношению запаса биогенов в биосфере к продукции биоты и имеет порядок десяти лет, что в 100 тысяч раз меньше времени эволюции. В результате эволюция естественной биоты происходит в условиях резкой ограниченности ресурсов биосферы, т. е. в условиях, крайне далеких от изобилия. Любое эволюционное изменение, связанное с нарушением скоррелированности синтеза и разложения органических веществ, в сообществе оказывается невозможным, ибо значительно быстрее этого изменения происходит полное локальное искажение окружающей среды в силу чрезвычайно высокой мощности синтеза и разложения органических веществ биотой. Это приводит к немедленной потере конкурентоспособности и вытеснению подобного сообщества.

2.3.9. Проблема прогресса

С ускорением эволюции при переходе от генетической эволюции к научно-техническому прогрессу в условиях свободного рынка время смены технологии сокращается до десятка лет и становится много меньше времени истощения ресурсов биосферы (времени их антропогенного оборота). В этой ситуации человечество попадает в состояние кажущегося изобилия природных ресурсов. Истощение ресурсов происходит слишком медленно и не успевает сказываться на технологии. Ресурсоистощающие технологии оказываются наиболее конкурентоспособными и быстро вытесняют все ресурсосберегающие технологии, включая естественные сообщества биосферы.

Экономический прогресс достигает максимальной скорости и эффективности использования природных ресурсов в условиях рыночной экономики при наибольшем числе конкурентно-взаимодействующих технологических единиц (технологических сообществ), решающих определенную задачу. Минимальный размер технологической единицы определяется необходимым для решения задачи радиусом скоррелированности предприятий. Однако в условиях кажущегося изобилия природных ресурсов рыночная экономика неизбежно приводит к максимальной скорости их истощения.

Отказ от конкурентного взаимодействия и рыночной экономики путем перехода к централизованному управлению в глобальных масштабах может привести к регулированию прогресса и сокращению скорости истощения природной среды. Но при наличии конкурентного взаимодействия с внешним окружением, развивающимся на базе рыночной экономики, централизованно управляемая система теряет конкурентоспособность и вытесняется. В стремлении противостоять вытеснению и повысить свою конкурентоспособность централизованно управляемая система в силу малой эффективности использования природных ресурсов может в локальных участках превзойти максимальную скорость истощения природной среды, развиваемую рыночной экономикой. Длительное существование централизованно управляемой системы возможно только при полной изоляции и прекращении конкурентного взаимодействия с внешним миром, что эквивалентно отсутствию (или ликвидации) последнего.

Глобальное истощение окружающей среды прогрессирующей рыночной экономикой может сопровождаться поддержанием стационарного состояния и даже видимого улучшения определенных локальных участков на основе разомкнутости круговорота веществ, т. е. непрерывного внесения необходимого количества потребляемых веществ и непрерывного удаления отходов. Этот принцип используется природой для поддержания жизни отдельного организма. Тот же принцип используется человеком для поддержания стационарного состояния своего жилища, приусадебного участка, парков и любых культурных комплексов. Однако разомкнутость локального круговорота означает, что существование искусственно поддерживаемого в стационарном состоянии участка сопровождается еще большим ухудшением состояния окружающей среды в остальной части биосферы. Это принцип заметания сора под ковер. Цветущий сад, озеро или река, поддерживаемые в стационарном состоянии на базе разомкнутого круговорота веществ, гораздо опаснее для биосферы в целом, чем заброшенная, превращенная в пустыню земля. В естественных пустынях продолжает действовать принцип Ле Шателье. Лишь величина компенсации возмущений оказывается ослабленной по сравнению с более продуктивными экосистемами.

Для того чтобы ресурсоистощающие технологии в условиях свободного рынка потеряли конкурентоспособность по сравнению

с ресурсосберегающими, необходимо, чтобы время оборота используемых ресурсов окружающей среды было бы много меньше времени смены технологии. Принимая в качестве времени смены современных технологий величину порядка десяти лет, получаем, что время оборота всех используемых ресурсов должно быть не более года. Между тем время истощения большинства невозобновимых ресурсов энергии и материалов имеет порядок ста лет. Для сокращения времени оборота технологических ресурсов необходимо либо увеличить скорость их потребления в сотни раз, либо в сотни раз сократить количество используемых ресурсов, т. е. или быстро израсходовать невозобновимые ресурсы, или отказаться от их использования. Только после выполнения этих условий экономика автоматически станет „экологичной”. В противном случае экономический прогресс в направлении стихийного роста конкурентоспособности должен привести к полному истощению всех ресурсов и разрушению приемлемого для жизни состояния окружающей среды.

Обратим внимание на то, что естественная биота не использует невозобновимых ресурсов. Это следует из постоянства запасов органического и неорганического углерода в биосфере. Опасность, связанная с началом использования этих ресурсов, кроется в существовании эволюции и прогресса. Только при наличии последних возникает возможность развития в направлении нарушения замкнутости круговорота веществ и тем самым разрушения окружающей среды. В консервативном состоянии, в отсутствие эволюции и прогресса (или, что то же самое, при бесконечных временах, характеризующих эти процессы) существовавшая ранее замкнутость круговоротов веществ не может быть нарушена у находящихся в консервативном состоянии сообществ даже при случайном переходе к использованию невозобновимых ресурсов, которые автоматически возобновляются в этом случае.

Из двух упомянутых возможностей перехода к ресурсосберегающей технологии при наличии прогресса на основе свободной конкуренции возможность, связанная с увеличением скорости потребления ресурсов в сотни раз (на которую до сих пор настроена современная цивилизация), могла бы привести к положительному результату только в том случае, если бы это увеличение скорости произошло мгновенно, т. е. за достаточно малое время, в течение которого продолжающийся прогресс не успел бы заметно исказить биосферу, окружающую среду и биоту. В действительности указанный рост потребления неизбежно будет растянут во времени. За этот период роста продолжающийся ресурсоистощающий технологический прогресс неизбежно разрушит биосферу, приведя ее в непригодное для жизни состояние.

2.3.10. Сохранение биосферы

Возможность развития общества, связанная с отказом от использования невозобновимых ресурсов, является вполне реальной.

Современное энергопотребление цивилизации на 90 % основано на невозобновимых ресурсах. Отказ от последних приведет к сокращению энергопотребления примерно в 10 раз. Во столько же раз должно произойти и сокращение численности населения. Это в свою очередь в 10 раз сократит антропогенное возмущение континентальной биоты, что позволит последней восстановить действие принципа Ле Шателье. Подчеркнем, что поддержание энергопотребления на современном уровне даже при переходе к так называемым экологически чистым источникам энергии означает продолжение разрушающего возмущения биосферы. Весь процесс сокращения должен быть растянут по времени настолько, чтобы технологический прогресс при сохранении свободной конкуренции успел перестроиться на ресурсосберегающие технологии. Это вполне реально может произойти за времена от нескольких десятков до сотни лет, в течение которых в силу постепенного сокращения антропогенного возмущения биосфера не успеет необратимо разрушиться. За это время всеобщий переход к однодетному рождению (которое соответствует двухпроцентному сокращению населения в год) привел бы к уменьшению численности населения как раз примерно в 10 раз.

Следует подчеркнуть, что переход от растущей сейчас с двухпроцентной скоростью численности населения к сокращающейся с той же скоростью не приведет ни к каким экономическим проблемам. Величина демографической нагрузки на общество детьми в первом случае переходит в нагрузку стариками той же величины. Величина демографической нагрузки при этом определяется как количество детей до 15 лет и стариков старше 60 лет, приходящихся на одного человека в возрасте от 15 до 60 лет. Наименьшую демографическую нагрузку имеет стационарное (не растущее и не сокращающееся) население. Однако в современном технологически развитом обществе дети должны проходить через дорогостоящий период обучения. Между тем современные старики длительно сохраняют здоровье и работоспособность и практически всегда могут обеспечить свое существование. Это приводит к тому, что экономическая нагрузка ребенком значительно превышает нагрузку стариком. В результате переход от роста численности населения к ее сокращению с той же скоростью приводит к сокращению экономической нагрузки на общество в несколько раз и может даже оказаться меньшим, чем в стационарном случае. Экономическая нагрузка при этом определяется как отношение числа неработающих к числу производительно работающих людей.

Традиционная боязнь депопуляции и политическое стимулирование высокого престижа многодетных семей связаны с неизбежной в прошлом потерей конкурентоспособности нацией, сокращающей численность населения, в сравнении с нацией, увеличивающей ее. Эта опасность исчезает при переходе ко всеобщему пропорциональному сокращению численности населения всех наций. Кроме того, при современных средствах обороны, основанных на ядерном оружии,

возможно сдерживание практически любой агрессии небольшим числом ресурсов. Это позволяет начать проводить программу сокращения численности населения и улучшения окружающей среды в отдельной стране, демонстрируя преимущества такого сокращения остальным странам. В последнее время престиж многодетных семей быстро снижается во всем мире, и человечество практически морально подготовлено ко всеобщему переходу на однодетное рождение. Таким образом, рассматриваемая возможность является реальной с экономической, демографической, экологической и морально-этической точек зрения.

Программа сокращения антропогенного возмущения и восстановления действия принципа Ле Шателье в биосфере может оказаться успешной при условии, что уже сейчас будет полностью прекращена в глобальных масштабах экспансия хозяйственной деятельности и освоение еще не искаженных цивилизацией естественных участков биосферы, которые должны стать реальными источниками восстановления биосферы. Поэтому следует немедленно провести детальную инвентаризацию сохранившихся частей биосферы с использованием всех современных технических средств, включая космическое дистанционное зондирование.

Наиболее продуктивными сообществами континентов являются леса и болота, среди которых максимальную продуктивность имеют тропические сообщества. Продуктивность этих сообществ в 4 раза превосходит продуктивность соответствующих сообществ умеренных зон. Поэтому с точки зрения эффективности компенсации возмущений внешней среды в соответствии с принципом Ле Шателье единица площади, занятая девственными тропическими лесами и болотами, эквивалентна четырем единицам площади, занятой девственными лесами и болотами в умеренной зоне. В отсутствие возмущений естественные леса и болота не воздействуют на внешнюю среду. В частности, леса не являются ни источником, ни поглотителями кислорода. Замкнутость леса по кислороду означает, что весь вырабатываемый растениями кислород утилизируется другими организмами сообщества. Девственный лес начинает воздействовать на внешнюю среду только при ее возмущениях, причем в направлении компенсации возмущений.

Отметим также, что сжигание всей органики биосферы совместно с запасом ископаемого топлива уменьшит содержание кислорода в атмосфере лишь на величину порядка 1%. В этом случае животные пострадали бы не от уменьшения концентрации кислорода, изменение которой они бы не ощутили, а от исчезновения органического вещества в биосфере.

Вторичный лес, вырастающий на вырубках, обладает примерно в 1000 раз худшей замкнутостью круговоротов веществ, чем девственный лес. За миллиарды лет эволюции природа выработала наиболее эффективные способы восстановления действия принципа Ле Шателье в кратчайшие сроки. Поврежденные участки леса зарастают породами,

которые образуют временные сообщества, быстро уменьшающие разомкнутость круговорота веществ. Примерно за 10 лет после ликвидации растительного покрова разомкнутость уменьшается со 100 до 10 %. Затем происходит последовательная смена сообществ (сукцессия), в процессе которой разомкнутость продолжает уменьшаться. По-видимому, примерно через 300 лет этот процесс заканчивается и лес переходит в первоначальное невозмущенное состояние (при наличии невозмущенного окружения у поврежденного участка, т. е. сохранения популяции естественных сообществ; см. выше). Если в целях экономической выгоды наискорейшего выращивания наиболее ценных пород деревьев вмешиваться в процесс сукцессии, например, обрабатывая вырубки ядохимикатами, подавляющими рост неценных пород, то сокращение разомкнутости сильно замедляется.

Периодические вырубки леса, происходящие сейчас в среднем через 50 лет после образования экономически пригодной для вырубки древесины, обрывают процесс восстановления первичного леса с замкнутым круговоротом веществ и способностью компенсировать возмущения внешней среды. Для возврата к естественной биосфере необходимо увеличить промежутки времени между последовательными вырубками леса до 300 лет, т. е. сократить вырубки в 6 раз в глобальном масштабе. Учитывая, что сейчас повсеместно вырубки превосходят объем даже естественного прироста, что приводит к сокращению лесных площадей, необходимо сократить вырубки леса минимум в 10 раз, т. е. во столько же раз, во сколько требуется сократить численность населения.

Биосфера с позиции позвоночных животных представляет собой энергетическую машину, стабилизирующую окружающую среду и снабжающую позвоночных необходимой для существования энергией, но работающую с к.п.д. 1 %. Остальные 99 % энергетической мощности биосферы затрачиваются на стабилизацию окружающей среды. Как было показано в разделе 2.3.5, действие принципа Ле Шателье в биоте континентов оказалось нарушенным, как только доля потребления человечеством продукции биоты на континентах превысила 1 %. Поэтому при хозяйственном освоении естественных участков биосферы следовало бы ввести международный налог в размере до 99 % дохода предприятий, который использовался бы на компенсацию нанесенного биосфере ущерба и поддержание существования жителей регионов, отказывающихся от хозяйственного освоения невозмущенных территорий. Такая политика могла бы привести к быстрому сокращению освоения биосферы.

2.3.11. Переход к ноосфере?

Альтернативный путь развития цивилизации состоит в ликвидации конкуренции между любыми группами людей, включая различные страны, и переходе к глобально скоррелированной цивилизации на основе ее централизованного управления, т. е. в построении

ноосферы. В этом случае сохранение всех видов живых организмов вне их природных сообществ представляло бы опасность для окружающей среды в глобальных масштабах, ибо, выйдя из-под контроля и размножаясь в неестественных пропорциях, эти виды могли бы разрушить всю среду обитания значительно быстрее, чем это делает сейчас человек, в силу огромной мощности синтеза и разложения веществ, которую может развить биота в объеме всей биосферы. Отметим, что примеры локальных разрушений окружающей среды при интродукции новых видов многочисленны и хорошо известны. Поэтому остатки возмущенной неустойчивой континентальной биоты, включая все не поддающиеся управлению дикие виды, должны были бы быть уничтожены. Сохранен мог бы быть только небольшой набор управляемых человеком культурных видов. Однако огромное число живых и технологических объектов, подлежащих в ноосфере централизованному управлению в глобальных масштабах, в отсутствие действия закона больших чисел приводило бы к неизбежному росту флуктуаций процессов синтеза и разложения биологической и технологической продукции. Это в конце концов должно было бы привести к разрушению окружающей ноосферы и гибели цивилизации.

В биосфере содержится около $N = 10^{27}$ не скоррелированных между собой живых организмов. Число объектов, которыми придется управлять в ноосфере, должно быть величиной того же порядка. Для того чтобы представить себе сложность такой задачи, отметим, что указанное число совпадает с числом молекул атмосферных газов в комнате. Задача централизованного управления ноосферой намного сложнее задачи искусственного создания максвелловского распределения молекул газа в комнате путем управления движением каждой молекулы так, чтобы флуктуации температуры и давления находились на естественном уровне, определяемом законом больших чисел, т. е. поддерживались с относительной точностью $1/\sqrt{N} = 10^{-13}$. Это выше возможности всех рекордных по точности физических измерений. С такой задачей вряд ли удастся справиться при любом развитии компьютерной техники, учитывая, что объем памяти и быстродействие ЭВМ лимитируются молекулярными размерами и скоростью света.

Однако даже при возможности построения ноосферы с той же устойчивой замкнутостью круговоротов веществ и тем же к.п.д., что и в биосфере, на поддержание этой замкнутости потребовалось бы не менее 99 % всех энергетических и трудовых затрат цивилизации. (Уже сейчас стоимость очистных сооружений составляет около половины стоимости всего предприятия). Так как предел энергопотребления человечества, совместимый со стабильностью климата, совпадает с мощностью биосферы, то на удовлетворение нужд цивилизации в условиях ноосферы человечество получило бы меньше мощности, чем оно может иметь в стационарной биосфере без забот о сохранении замкнутости круговоротов.

2.3.12. Заключение

Повторим основные утверждения и их эмпирическое обоснование. Все живые объекты организованы на базе сложнейших видов внутренней скоррелированности. Все виды биологической скоррелированности неустойчивы и подвержены непрерывному распаду. Оба утверждения проверены на всех уровнях, от генетического до структуры сообществ. Любые виды скоррелированности в биологии, от клетки до сообществ, поддерживаются за счет конкурентного взаимодействия особей в популяции и стабилизирующего отбора. (Это проверено только для организмов и некоторых простейших сообществ). Неизвестны другие способы компенсации происходящего распада. Отсюда следует, что все сообщества аналогично всем организмам могут существовать только в популяциях конкурентно-взаимодействующих сообществ. Это утверждение не противоречит никаким известным эмпирическим данным и имеет множество косвенных подтверждений. Прямых измерений размеров сообществ и численности их популяций до сих пор нет.

Сообщества – самые сложные виды биологической скоррелированности. Возникновение сообществ связано только с необходимостью замкнутости круговорота веществ и стабилизации условий окружающей среды. Существует много примеров устойчивого существования популяций отдельных видов вне их естественных сообществ при наличии разомкнутости круговоротов веществ. Нет никаких оснований для надежд построения искусственных сообществ, обеспечивающих стабилизацию окружающей среды с той же степенью точности, что и естественные сообщества. Поэтому сокращение естественной биоты в объеме, превышающем пороговое значение, лишает устойчивости окружающую среду, которая не сможет быть восстановлена построением очистных сооружений и переходом к безотходному производству.

Пороговое значение этой величины определено Горшковым и др. [15] на основе двух независимых эмпирических результатов. Во-первых, показано, что доля потребления крупных животных во всех известных естественных сообществах не превосходит 1 % естественной биологической продукции. Во-вторых, на основе анализа данных круговорота углерода показано, что нарушение стабилизации окружающей среды наземной биотой произошло после начала промышленной революции, когда антропогенная доля потребления продукции биосферы превысила 1 %. До этого времени оставшаяся невозмущенная часть биосферы в течение тысяч лет компенсировала все возмущения, вносимые деятельностью людей, преобразовавших естественные сообщества практически всей Европы и части Азии.

Таким образом, существуют веские основания полагать, что биосфера, состоящая из возникшей в процессе эволюции естественной биоты и взаимодействующей с ней внешней и окружающей среды,

представляет собой единственную систему, обеспечивающую устойчивость окружающей среды при любых возникающих возмущениях. Поэтому сохранение природных сообществ и существующих видов живых организмов в объеме, способном обеспечивать выполнение принципа Ле Шателье по отношению к глобальным возмущениям окружающей среды, представляет собой главное условие продолжения жизни на планете. Для этого необходимо сохранить естественную природу на большей части поверхности Земли, а не только в генных банках и ничтожных по своей площади резерватах, заповедниках и зоопарках. Необходимо ставить вопросы о создании заповедных материков и океанов. Первым шагом в этом направлении может стать сохранение заповедной Антарктиды, которое интенсивно обсуждается сейчас во всем мире. Человечество может неограниченно долго существовать только на заповедной планете Земля.

3. ГЛОБАЛЬНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: РОЛЬ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

С точки зрения проблематики глобальной экологии все возрастающую роль играет комбинированное использование обычных и спутниковых средств наблюдений за оценками состояния природной среды и ее возможных изменений в будущем. Задача изучения Земли как целостной природной системы, поставленная Международной геосферно-биосферной программой [29–31, 74–76, 78, 100, 101], может быть решена только на основе широкого применения космических средств наблюдений [24–30, 76]. Важное значение в этой связи имеет программа „Миссия к планете Земля”.

3.1. Ключевые направления разработок глобальной системы экологического мониторинга

Как справедливо отметил Б. Мур [88], с точки зрения исследований геосферы–биосферы особый интерес представляет изучение биогеофизических круговоротов углерода, азота, фосфора и серы, которые определяются как природными, так и антропогенными факторами. Последние особенно существенны для круговорота углерода, который все еще остается недостаточно изученным, причем главными источниками неопределенностей являются процессы, связанные с вкладом динамики континентальной биомассы (вырубка лесов и др.), а также с изменениями суммарной продуктивности экосистем, обусловленными вариациями круговоротов других компонентов. Это определяет актуальность спутникового слежения за динамикой биомассы в глобальных масштабах с „телескопированием” для оценок детальной пространственно-временной изменчивости биомассы в отдельных регионах, которые могут оказаться надежными лишь при наличии адекватных контрольных данных наземных прямых измерений.

Ключевой аспект круговорота углерода связан с оценками вклада морской биоты и обмена углеродом между атмосферой и океаном. Принципиальное значение имеет учет взаимодействия между круговоротами углерода и азота. Динамика цикла азота определяется тремя процессами с различной постоянной времени: долговременными процессами поступления азота в атмосферу и из атмосферы; более

быстрым обменом азотом внутри биосферы; усиливающимся поступлением азота антропогенного происхождения (только за счет высокотемпературных процессов сгорания в атмосферу поступает около 20 Мт азота в год, а использование удобрений означает добавление около 40 Мт связанного азота в год). Однако глобальное антропогенное воздействие на круговорот азота все еще остается незначительным по сравнению с резервуарами азота в почве и в океанах. Лишь через несколько десятилетий (или через столетие) оно может стать существенным.

В отличие от циклов углерода, азота и серы круговорот фосфора не зависит от процессов в атмосфере. Основные процессы связаны в данном случае с растворенным и находящимся в форме частиц фосфором в реках, процессами выветривания и диогенезиса в почвах и в осадочных породах. Остаются нерешенными важные вопросы о доле переносимого реками фосфора, участвующей в биологическом цикле, и характерных масштабах времени переноса фосфора в океан. К числу главных аспектов исследований глобального круговорота фосфора принадлежат: 1) механизмы, контролирующие наличие фосфора в почвах, в том числе влияние антропогенных факторов (например, кислотных осадков); 2) перенос фосфора реками в океан; 3) связь биопродуктивности океана и содержания фосфора (в частности, влияние поступления фосфора на фиксацию азота в прибрежных зонах).

Большое внимание привлекает проблема антропогенных воздействий на круговорот серы. Имеющиеся косвенные оценки свидетельствуют о том, что уже сейчас выбросы газообразной серы в атмосферу (за счет процессов сжигания топлив) достигли того же порядка величины, что и вклад природных факторов. Особый интерес представляет: 1) оценка биологически обусловленных газообразных соединений восстановленной серы, исследования определяющих их процессов и антропогенных воздействий; 2) изучение трансформации антропогенных выбросов сернистого газа и преобразований газообразных соединений серы в атмосфере вообще. Поскольку процессы антропогенного воздействия на биогеохимические круговороты протекают медленно и оказываются сильно инерционными, это определяет острую актуальность заблаговременного выявления соответствующих опасных тенденций.

Ч. Дельвиче [63] привлек внимание к тому, что использование спутниковых дистанционных методов составляет наиболее надежную основу для изучения особенностей географического распределения экосистем и границ между ними, масштабов и темпов антропогенного воздействия на экосистемы, влияния климата и других факторов на экосистемы. Особый интерес представляют эти методы с точки зрения слежения за изменчивостью биогеохимических круговоротов, контроля динамики первичной продуктивности на континентах и в океанах по вариациям биомассы и содержания хлорофилла. В табл. 3.1 приведена краткая характеристика соответствующих требований

Таблица 3.1

Требования к данным дистанционных наблюдений биогеохимических источников, стоков и потоков

Наблюдаемая величина, параметр атмосферы	Цель наблюдений	Область спектра
Границы экосистем	Индикаторы вариаций, обусловленных изменениями в окружающей среде	Видимая или близкая ИК
Шлейфы замутнений в реках	Индикаторы эрозии и эвтрофирования	То же
Содержание хлорофилла в океане	Индикатор первичной продуктивности и ее изменений	Видимая (включая наблюдения вынужденной флуоресценции)
CH_4 — общее содержание в тропосфере	Интенсивность биологических и антропогенных источников, время жизни	ИК-поглощение или лидарное зондирование
CH_4 — интенсивность источников (и градиентов) в отдельных регионах	То же	То же
N_2O — общее содержание в атмосфере и (желательно) градиенты над отдельными регионами	Биологические и антропогенные сельскохозяйственные источники	" "
CH_3Br — общее содержание и (желательно) градиенты	Распознавание предполагаемых биологических источников	" "
$(\text{CH}_3)_2\text{S}$, $(\text{CH}_3)\text{SH}$, SH_2 — общее содержание и (желательно) градиенты	Распознавание предполагаемых биологических источников и времени их функционирования	ИК-поглощение или лидарное зондирование
NH_3 — градиенты в тропосфере над отдельными районами (леса, участки выбросов и др.)	Интенсивность биологических источников	Требуется разработка
Неметановые углеводородные соединения — градиенты в тропосфере над отдельными районами	Распознавание предполагаемых биологических источников и времени их функционирования	То же

к данным наблюдений. По-видимому, наиболее перспективная методика — лидарное зондирование (главным образом по принципу дифференциального поглощения).

Ключевую роль в формировании глобальных круговоротов биогенных компонентов и в продуктивности биосферы играет Мировой океан [51]. С точки зрения биогеохимических круговоротов океан функционирует как крупный резервуар биогенных компонентов. Критически существенным звеном функционирования этого резервуара является обмен веществ между верхними и глубокими слоями океана, между океаном и сушей, между океаном и атмосферой. Во многих случаях известные скорости подобного обмена недостаточно надежны. Биопродуктивность океана, будучи малой в расчете на единицу площади, суммарно составляет значительную долю продуктивности биосферы ввиду большой площади океана и тесно связана с биогеохимическими круговоротами. Так, например, скорость трансформации нитрата в органические соединения азота зависит от продуктивности фитопланктона, которая в свою очередь определяется наличием биогенных компонентов.

В области исследований глобальных биогеохимических круговоротов и продуктивности океана особым интересом представляют: 1) картирование пространственно-временной изменчивости биомассы и продуктивности фитопланктона в Мировом океане; 2) взаимодействие биологических и физических процессов и его влияние на распределение и скорость роста биомассы фитопланктона. Ключевое значение имеют в связи с этим следующие вопросы: 1) выявление районов сильной мезомасштабной изменчивости продуктивности; 2) анализ влияния такого рода изменчивости на глобальную продуктивность и биогеохимические круговороты; 3) „климатология”, сезонная и межгодовая изменчивость продуктивности биомассы; 4) контрасты между океанами южного и северного полушарий, прибрежными и океанскими водами; 5) вертикальная структура биомассы и продуктивности, ее временные вариации и ее влияние на процессы перераспределения по горизонтали.

При изучении взаимодействия биологических и физических процессов к числу приоритетных вопросов принадлежат: 1) соотношение между мезомасштабными явлениями (вихри, меандрирующие фронты, прибрежные струйные течения и др.) и мезомасштабными распределениями биомассы и продуктивности; 2) влияние топографии дна и побережья на биологические процессы; 3) связь между мезо- и крупномасштабными процессами; 4) процессы, контролирующие обмен веществом между прибрежными и океанскими водами; 5) влияние общей циркуляции океана (включая поверхностные течения, противотечения и длинные волны) на удаленные географические районы Мирового океана; 6) влияние климата на биологические процессы; 7) распределение основных биогенных компонентов; 8) поступление биогенных компонентов из глубинных в поверхностные воды; 9) параметризация перемешивания в поверхностном слое.

С точки зрения требований к данным наблюдений главная роль принадлежит сведениям о пространственно-временной изменчивости биомассы фитопланктона и продуктивности, которые могут быть получены при помощи спутника на солнечно-синхронной орбите с аппаратурой типа сканера цвета океана для диапазона 350–800 нм (при разрешении 10 нм), обеспечивающей получение глобальной информации за одни сутки при пространственном разрешении выше 1 км в прибрежных зонах и 4×4 км² в открытом океане. Для наблюдений флуоресценции хлорофилла „а” требуются данные в интервале 600–750 нм при разрешении 5 нм, а глобальное картирование биолюминесценции обеспечат данные в интервале 450–550 нм (разрешение 10 нм) при пространственном разрешении 5×5 км². Спутниковые наблюдения должны сопровождаться контрольными судовыми и буйковыми наблюдениями.

Известно, что Мировой океан играет ключевую роль в смягчении климата на Земле благодаря своей гигантской инерции, переносу тепла к полюсам и формированию облачного покрова. Не менее важное значение имеет вклад океана в глобальный круговорот углерода, а также процессы переноса и трансформации биогенных компонентов, определяющие условия биопродуктивности [60, 63].

„Классическая” картина общей циркуляции океана, построенная на основе анализа данных судовых наблюдений, не может считаться вполне достоверной по двум причинам: 1) нерепрезентативность полей океанографических характеристик, построенных по фрагментам и (разновременным) данным судовых наблюдений (хотя на долю низкочастотных компонентов переноса приходится относительно большое количество энергии, существенную роль играет динамическое и кинематическое взаимодействие движений меньших и крупных масштабов); 2) остается неизвестным вклад вариаций уровня поверхности океана в формирование поля давления в толще океана. Неотложной поэтому является задача комбинированного применения обычных и спутниковых средств наблюдений для более полных исследований динамики и термики Мирового океана.

Таблица 3.2 отображает приоритетность физических характеристик океана и требования к соответствующим данным наблюдений. В дополнение следует упомянуть о возможности определения вектора скорости морских течений по прослеживанию со спутника дрейфующих буйев и акустических генераторов. Принципиально существенно сочетание анализа данных наблюдений и имитационных численных экспериментов.

Как отметил Д. Мелак [86], центральный аспект исследований биосферы состоит в выяснении того, в какой степени земная поверхность, атмосфера и гидросфера подвержены воздействию биологических, а не абиотических процессов. Серьезного прогресса следует ожидать в связи с этим от использования космических средств наблюдений с целью слежения за биологической продуктивностью и той

Таблица 3.2

Требования к данным наблюдений
в области физической океанографии

Наблюдаемая величина	Цель наблюдений	Средства наблюдений
Топография (высота) поверхности океана	Циркуляция океана: геострофическая скорость у поверхности, локализация мезомасштабных явлений (фронты, вихри, ринги); взаимодействие физических и биологических процессов	Радиовысотомер на спутнике с углом наклона орбиты 65° (желательна негелиосинхронная орбита с повторностью витков 10–20 сут; ИК- и СВЧ-радиометр для атмосферной коррекции)
Существенная высота волн ($H_{1/3}$)	Прогноз ветра, волнения и зыби	Радиовысотомер, радиолокатор бокового обзора (РБО)
Температура поверхности океана	Взаимодействие атмосферы и океана, а также физических и биологических процессов	ИК-радиометры типа используемых на метеорологических спутниках
Скорость — сдвиг ветра у поверхности океана	Циркуляция океана (индуцированная ветром, агеострофический компонент, апвеллинги), взаимодействие океана и атмосферы	Скаттерометр в полосе K_u , измерения через 50 км в полосе $\pm 70^\circ$ широты через каждые двое суток
Спектр направлений поверхностных волн	Прогноз волнения и ветра, слежение за перемещением штормов	РБО, скаттерометр, сканирующий короткоимпульсный радиовысотомер

частью биогеохимических круговоротов, которая связана с водными системами.

До сих пор отсутствуют надежные количественные оценки влияния живых организмов на состав атмосферы, гидросферы и осадочные породы. Это определяет, в частности, необходимость оценки роли диатомовых и болот в глобальных биогеохимических круговоротах, что требует: 1) оценок ареалов этих организмов или экосистем; 2) измерений фиксации углерода, скорости осадконакопления и образования газов.

В свете крупномасштабного антропогенного воздействия на круговороты углерода, азота, серы и фосфора существует острая потребность в измерениях природных и суммарных потоков этих элементов в глобальных масштабах. Это вызывает необходимость разработки дистанционных методов измерений биологической продуктивности, а также потоков различных компонентов между внутренними водоемами, океаном, сушей и атмосферой с учетом ряда специфических характеристик внутренних водоемов: 1) размеры от умеренных до малых (длина от 100 м до 1 км); 2) сильная разбросанность по территории суши; 3) протяженная граница между водой и сушей; 4) очень широкий диапазон оптических условий (так, например, концентрация

Таблица 3.3

Требования к данным наблюдений внутренних водоемов

Объект наблюдений	Цель наблюдений	Виды информации
Районы болот и наводнений	Биологическая продуктивность фиксации азота. Источники восстановленных газов	Многоспектральные изображения (включая РВО) при разрешении 30 м, 1 раз в сутки, 2 раза в неделю
Хлорофилл фитопланктона и биомасса	Пространственно-временная неоднородность биологической продуктивности	Многоспектральные изображения (30 м), включая спектротрические, измерения флуоресценции
Использование земель в бассейне водосбора	Содержание биогенных компонентов и взвесей (в связи с качеством воды и продуктивностью)	Многоспектральные изображения (включая РВО), 30 м, ежемесячно или ежегодно
Сток и связанные с ним гидрологические параметры	Содержание биогенных компонентов и взвесей	Видимый, ИК- и СВЧ-диапазоны, ежедневно или еженедельно
Температура поверхности	Гидрография, испарение и продуктивность	ИК-изображения, 30 м, ежедневно или еженедельно

хлорофилла может варьировать от 0,01 до 100 мг/м³); 5) быстрые изменения биологических, химических и физических условий со временем (при вариациях характерного времени от секунд до недель, но для экологически наиболее существенных изменений – порядка нескольких суток); 6) важность эпизодических и периодических флуктуаций; 7) наличие сильных горизонтальных и вертикальных градиентов биологических и физико-химических характеристик.

Таблица 3.3 содержит схематические требования к данным наблюдений внутренних водоемов. Биологическая продуктивность может быть найдена по данным измерений фотосинтетической активности, что требует измерений количества фотосинтезирующего вещества, скорости фиксации углерода и определения доли фиксированного углерода, которая потребляется другими организмами или накапливается в осадках. Потоки различных компонентов с суши во внутренние водоемы зависят главным образом от характера землепользования в бассейне водосбора и гидрологических условий. Уже стали практически возможными, например, оценки поступления биогенных компонентов в озера по данным дистанционной индикации и характеристик территории водосбора, включая землепользование и снежный покров.

В связи с важной ролью лесов в формировании биогеохимических круговоротов углерода и азота, а также воздействием лесов на

Таблица 3.4

Требования к данным наблюдений лесов
и другой природной растительности

Наблюдаемая величина	Цель наблюдений	Виды информации
Потоки массы и энергии, падающая и отраженная коротковолновая радиация, соотношения между потоками радиации, скрытого и явного тепла	Компоненты энергетического баланса лесов и природной растительности Анализ влияния вырубки лесов на микроклимат и распространение заболеваний	Видимая и ИК-области спектра, пространственное разрешение 50–60 м, по крайней мере ежемесячно Температура поверхности, альбедо, содержание водяного пара, 50–60 м, ежемесячно
Компоненты гидрологического цикла: осадки, эвапотранспирация, речной сток, влагозапас почвы, снегозапас	Локальный и региональный водный баланс для главных рек и влияние на него землепользования и вырубки лесов	СВЧ-измерения содержания воды в почве (1 км ²) и влагосодержания атмосферы, измерения стока и зеркала стоячих вод, ежемесячно
Плотность, структура и биомасса растительного покрова	Взаимосвязь характеристик растительности с энергетическим и водным балансами	Многоспектральные изображения (поля яркости), 60 м
Характеристики почвы	Содержание углерода и азота в почвах	Регрессионная связь многоспектральных спутниковых и наземных данных
Состояние растительности	Оценка состояния растительности, ее классификация и слежение за сезонной динамикой	Многоспектральные изображения, 30–60 м, еженедельно

энергетический и водный балансы П. Зинке [112] отметил необходимость решения, в частности, следующих вопросов: 1) влияние лесов (в том числе в связи с вырубкой лесов) на формирование осадков в больших пространственных масштабах; 2) влияние лесов на локальный и региональный энергетический баланс и в этой связи – на климат; 3) роль лесов как источника или стока углекислого газа; 4) влияние таких параметров качества внутренних вод, как температура и мутность воды в реках и озерах и др., на практику землепользования, приводящую к изменениям растительности и лесов в бассейне водосбора.

Таблица 3.4 иллюстрирует ориентировочные требования к данным наблюдений, которые могут быть получены с помощью методов

Таблица 3.5

Требования к наблюдениям биологических процессов на суше

Наблюдаемая величина	Цель наблюдений	Виды наблюдений
Листовой индекс, фитомасса	Скрытое тепло и поток CO_2 фитомасса главных экосистем	Видимый, ИК- и СВЧ-диапазоны, разрешение 30 м, наблюдения отдельных участков в 13–15 ч через каждые 3–5 сут
Морфология растительности	Распознавание видов, поглощение света, выявление увядания	То же, наблюдения при трех углах визирования
Влажность почвы	Пространственная изменчивость характеристик растительности Скрытое тепло, продуктивность, энергетический баланс	То же, разрешение 10 м СВЧ-радиометрия (слой 0–5 см), ежедневно
Температура поверхности	Энергетический баланс, засуха и опустынивание	ИК-радиометрия, 30 м, ежедневно, в околополуденное время

дистанционной индикации, с целью оценки компонентов гидрологического и энергетического балансов, а также биогеохимических круговоротов. Одним из примеров являются исследования вклада тропических лесов в бассейне Амазонки как источника воды, что требует анализа водного баланса леса с учетом осадков и эвапотранспирации.

Данные табл. 3.5, составленной Э. Канемасу [72], иллюстрируют требования к наблюдениям параметров, характеризующих биологические процессы на суше. В связи с изучением этих процессов одна из важнейших проблем – наличие воды и способность растений извлекать воду из почвы, сильно влияющие на процессы транспирации и фотосинтеза. Ключевое место занимает изучение специфики энергетического баланса различных экосистем: пустынь, лесов, саванн, сельскохозяйственных районов и др. Количество и качество растительности в этих системах находится в существенной взаимозависимости с характером процессов в окружающих районах. Очевидно, например, что вырубка лесов и опустынивание сильно влияют далеко за пределами их непосредственного воздействия, приводя к значительным изменениям потоков CO_2 и водяного пара, а также потоков биогенных компонентов в обширном регионе.

Речной сток и движение взвесей радикально изменяют свойства водной среды по направлению течения рек. Изменения альбедо поверхности влияет на тепловой баланс и климат. Возникающее

в таких условиях взаимодействие поверхности суши, атмосферы и океанов представляет главный интерес, а понимание природы взаимодействия требует более полных данных наблюдений. Особым приоритетом обладают данные о тепловом балансе подстилающей поверхности, которые должны быть получены путем сочетания обычных и спутниковых методов наблюдений. Как видно из табл. 3.5, целый ряд биофизических характеристик (листовой индекс, фитомасса, структура и температура) может быть найден на основе использования дистанционных методов.

В масштабах времени порядка десятилетия и более атмосфера, суша и океан функционируют как взаимодействующая система в отношении не только физических, но также химических и биологических процессов. В связи с этим Ф. Монен [87] проанализировал роль тропосферы с точки зрения протекания в ней тех основных процессов, которые контролируют химический состав, а также круговороты различных компонентов тропосферы и определяют реакцию тропосферы на различные внешние воздействия.

Следующие вопросы имеют ключевое значение: 1) вклад биологических источников в формирование круговоротов соединений углерода, серы, азота и галогенов (наиболее важное значение имеют леса умеренных и тропических широт, зоны травяного покрова, интенсивно культивируемые районы, прибрежные воды и засоленные болота, зоны континентального шельфа, апвеллингов и тундры, открытый океан, участки сжигания биомассы); 2) интенсивность источников аэрозоля (пыль, сжигание топлив и т. п.) в региональных и континентальных масштабах (особый интерес представляет аэрозоль пустынь); 3) глобальное распределение основных газовых и аэрозольных компонентов, участвующих в химических круговоротах, и компонентов гидрологического цикла (водяной пар, облака, осадки), имея в виду исследования фотохимических процессов, а также сухого и влажного осаждения газов и частиц (важное значение имеет в этой связи имитационное численное моделирование). Таблица 3.6 иллюстрирует ориентировочные требования к данным дистанционных наблюдений химического состава тропосферы.

Перспективы дальнейшего развития спутникового дистанционного зондирования тропосферы связаны прежде всего с решением проблем глобального круговорота воды, динамики облачного покрова, взаимодействия атмосферы и океана, атмосферной циркуляции в тропиках и изменяющегося газового состава тропосферы [80]. Соответствующие требования к данным наблюдений охарактеризованы в табл. 3.7.

Хотя за последние годы были достаточно хорошо изучены наиболее важные аспекты средней атмосферы (СА), все еще остается много нерешенных вопросов, касающихся, в частности, взаимодействия тропосферы и средней атмосферы, которое проявляется в форме обмена массой, энергией и химическими компонентами.

Таблица 3.6

Требования к данным наблюдений
химического состава тропосферы

Наблюдаемая величина	Цель наблюдений	Примечания
CO ₂ , CO, CH ₄	Понимание биогеохимических круговоротов	Восстановление содержания газов в трех слоях толщи (0–15 км) при горизонтальном разрешении 10 км и погрешностях ±0.3 млн ⁻¹ (CO ₂), ±10 млрд ⁻¹ –0.3 млн ⁻¹ (CO), ±100 млрд ⁻¹ –3 млн ⁻¹ (CH ₄)
ОН	Время жизни в тропосфере таких газов, как СО и СН ₄	Минимальный предел обнаружения 0.5·10 ⁶ мол./см ³
NO, NO ₂ , NH ₃ , N ₂ O	Круговорот азота	Предел обнаружения 0.1 млрд ⁻¹
HNO ₃ , NO ₃	” ”	Предел обнаружения 0.05 млрд ⁻¹
SO ₂ , H ₂ S, COS и другие соединения серы	Круговорот серы	То же
H ₂ , H ₂ O	Круговорот водорода	Диапазон до 0.02 млн ⁻¹ (H ₂) и от 1 до 5·10 ⁵ млн ⁻¹ (H ₂ O)
O ₃	Круговорот кислорода и оксидантов	Диапазон 2–2000 млрд ⁻¹
Аэрозоль	Круговорот аэрозоля (включая круговороты серы и азота)	Диапазон 0.1–100 мкг/м ³
Температура, скорость ветра, облачность, интенсивность осадков, молнии	Интерпретация всех круговоротов	Разрешение по вертикали 1 км, скорости ветра до 1 м/с

Особенно важное значение имеет долговременная эволюция состава СА, в значительной степени обусловленная антропогенным воздействием. Для понимания этой эволюции необходимы данные о всех долгоживущих основных компонентах СА (включая те, которые являются источниками радикалов, сами радикалы и молекулы „стоки”, обуславливающие удаление активных компонентов СА) на протяжении по крайней мере одного 11-летнего цикла солнечной активности.

Минимальные требования к данным наблюдений воспроизведены в табл. 3.8. Эти требования будут в значительной степени удовлетворены при помощи аппаратуры, подготовленной для спутника с целью изучения верхней атмосферы.

Спутник для изучения верхней атмосферы (UARS), который выведен в 1991 г. на круговую орбиту высотой 600 км при угле

Таблица 3.7

Требования к данным наблюдений тропосферы

Наблюдаемая величина	Цель наблюдений	Примечания
Влажность, воздуха	Связь крупномасштабной циркуляции с влажностью почвы и эвапотранспирацией	СВЧ-, ИК-радиометрия, близкий ИК-диапазон, лидар. Не менее трех уровней ниже 500 гПа при пространственном усреднении 2° широты $\times 2^\circ$ долготы, погрешность $\pm 20\%$, дважды в сутки глобальная информация
Влажность верхнего слоя почвы (1 м)	То же	Активная и пассивная СВЧ-аппаратура, ИК-радиометры; разрешение не хуже $2^\circ \times 2^\circ$, дважды в сутки над континентами
Эвапотранспирация	" "	Та же аппаратура, оценки влагообеспеченности растительного покрова
Осадки над океанами	Годовые и межгодовые вариации тропического океанического источника влаги	Та же аппаратура, $2^\circ \times 2^\circ$, наблюдения осадков 4 раза в сутки (критически важную роль играют наземные контрольные данные). Оценки испарения требуют данных о профилях влажности и ветра, температуре поверхности океана и облачности
Облака (температура и высота верхней границы, толщина, альбедо, влажность и водосодержание). Ветер в тропиках	Связь с годовым ходом и межгодовой изменчивостью климата (особенно влияние облаков на тепловой баланс) Изучение циркуляции в тропиках	Видимая, близкая ИК и ИК-области спектра, количество облаков (0–10 баллов); высота верхней границы ± 0.5 км; 4 раза в сутки на сетке $2^\circ \times 2^\circ$ Доплеровский лидар, не реже 4 раз в сутки на сетке 100×100 км ² с погрешностью ± 2 м/с, не менее чем на трех уровнях

наклона 57° (планируемое время жизни спутника 18 мес.), позволяет осуществлять дистанционное зондирование атмосферы в диапазоне высот 0–150 км [105]. Для восстановления состава атмосферы и температуры на спутнике установлена разнообразная аппаратура.

1. Криогенный (на твердом неоне, -260°C) лимбовый спектрометр, основу которого составляет эталон Фабри–Перо (CLAES) для интервала длин волн 3.5–12.7 мкм. Данные спектрометра позволяют восстанавливать вертикальные профили концентрации различных компонентов семейств азота и хлора, озона, водяного пара, метана

Таблица 3.8

Требования к данным наблюдений средней атмосферы

Наблюдаемая величина	Цель наблюдений	Примечания
Температура	Химия, динамика, перенос, энергетика СА	Слой 0–150 км с разрешением 0.5 шкалы высот по вертикали и погрешностями не более ± 2 К (0–80 км), ± 5 К (8–120 км), ± 10 К (120–150 км); погрешности относительных величин вдвое меньше
Ветер	Динамика, перенос	Слой 0–50 км (погрешность ± 3 м/с), 50–150 км (± 10 м/с)
Состав: молекулы – источники радикалов O_3 , N_2O , CH_4 , $CFCl_3$, CF_2Cl_2 , H_2O ; „резервуарные” молекулы HCl , HNO_3 , H_2O_2 , HNO_4 , $ClONO_2$; радикалы ClO , NO , NO_2 , OH , HO_2	Химия, перенос	На различных высотах с погрешностями ± 10 % (необходимая) и ± 5 % (желательная). Разрешение по вертикали 0.5 шкалы высот
Эмиссии: O_2 ($^1\Delta g$), полосы OH (1–4 мкм), NO (2.8, 5.3 мкм), CO_2 (4.3, 10.4 мкм)	Энергетика верхней мезосферы–нижней термосферы (нарушения локального термодинамического равновесия)	Разрешение по вертикали 0.5 шкалы высот, погрешность ± 25 % (погрешность относительных величин ± 10 %)

и CO_2 . Наличие линейки на 20 датчиков определяет возможность одновременных измерений на 20 уровнях в диапазоне 10–60 км.

2. Усовершенствованный зондировщик стратосферы и мезосферы (ISAMS), прототип которого был установлен на спутнике „Нимбус-7”, представляет собой многоканальный фильтровый сканирующий ИК-радиометр, сконструированный по принципу селективного радиометра с газовыми кюветами и снабженный восемью приемниками излучения (охлажденными до $-195^\circ C$). Прибор охватывает диапазон длин волн 4.6–16.6 мкм и позволяет восстанавливать содержание соединений азота, озона, водяного пара, метана и окиси углерода.

3. Микроволновый лимбовый зондировщик (MLS) предназначен для восстановления вертикальных профилей концентрации окиси хлора (это будет сделано впервые), перекиси водорода, водяного пара и озона по данным о радиотепловом излучении на частотах (длинах волн) 63 (4.8), 183 (1.64) и 205 ГГц (1.46 нм).

4. Аппаратура затменного эксперимента по измерению галогенов (HALOE) основана на принципе измерения поглощения в ИК-диапазоне (2.43–10.25 мкм) на „затменных” трассах солнечной радиации

с целью восстановления содержания HCl , HF , CH_4 , CO_2 , O_3 , H_2O и различных компонентов семейства соединений азота. Как и в ISAMS, в этой 8-канальной аппаратуре использованы принципы селективного поглощения (газовые кюветы) и широкополосные фильтры. Восьмой канал обеспечивает измерения поглощения углекислым газом для восстановления атмосферного давления.

5. Комплекс аппаратуры, разработанной для спутника UARS, впервые позволил получить данные о глобальном поле горизонтального компонента ветра в верхней атмосфере. Этой цели служит доплеровский видеоспектрометр высокого разрешения (HRDI) и видеоинтерферометр для восстановления поля ветра (WINDII). Оба прибора сканируют по вертикали и предназначены для измерения доплеровского смещения отдельных эмиссионных или абсорбированных линий в двух направлениях, что позволяет определять истинную скорость ветра, зная скорость спутника. На высотах ниже 45 км HRDI, основу которого составляет тройной эталон Фабри–Перо, обеспечивает измерение доплеровских смещений эмиссионных линий в полосе молекулярного кислорода и определение скорости ветра с погрешностью не хуже 5 м/с. На высотах более 60 км осуществляются измерения в линиях нейтрального и ионизированного атомарного кислорода в видимой и близкой ИК областях спектра, что обеспечивает определение скорости ветра в мезосфере и термосфере с погрешностью не хуже 15 м/с при вертикальном разрешении, равном 4 км (рассматриваемое измерение эмиссии можно производить как ночью, так и днем).

6. Аппаратура WINDII, являющаяся видеоинтерферометром, обеспечивает измерения доплеровского смещения эмиссионных линий. С этой целью, кроме линий нейтрального и ионизированного атомарного кислорода, использованы две линии гидроксила и одна – молекулярного кислорода. Диспергирующей системой для WINDII служит фурье-спектрометр высокого разрешения. Измерения осуществляются одновременно под углами 45 и 135° по отношению к вектору скорости спутника. Вертикальное (горизонтальное) разрешение составляет 4 (20) км, а погрешности восстановления ветра в слое 80–300 км не превосходят 10 м/с. Комплекс аппаратуры UARS включает также приборы для измерений солнечной и ионизирующей радиации.

7. Монитор солнечного спектрального УФ-излучения (SUSIM) предназначен для измерений внеатмосферной инсоляции в интервале 120–400 нм при разрешении до 0.1 нм с обеспечением надежной абсолютной калибровки. Эта аппаратура состоит из двух спектрометров, семи приемников излучения и четырех дейтериевых УФ-ламп (для калибровки). Один спектрометр предназначен для измерений солнечной УФ-радиации, а другой осуществляет мониторинг калибровочных ламп. Одна из четырех ламп каждые сутки располагается перед обоими спектрометрами для очередной калибровки, а ее стабильность контролируется с помощью остальных трех ламп.

8. Специальный трехканальный спектрометр SOLSTICE предназначен для сравнения излучения Солнца (днем) и устойчиво ярких

Таблица 3.9

Требования к данным наблюдений полярных ледников

Наблюдаемая величина	Цель наблюдений	Требования к данным наблюдений
Высота уровня поверхности	Динамика ледников	Профильные измерения при помощи лазерного высотомера с погрешностью ± 2 м на леднике и ± 0.2 м в зоне шельфа. Расстояние между профилями 1 км
Изменение высоты уровня	Динамика и баланс массы ледников	Радиовысотомерные наблюдения для трасс через каждые 20 км с интервалом 1–2 года. Погрешность ± 0.1 –1 м
Граница льдов со стороны моря	Скорость перемещения границ	Наблюдения на шельфе при помощи РБО через 2 года (погрешность ± 30 м) и внутри ледника через 5 лет (± 30 м)
То же внутри ледника	То же	Измерения через 5 лет с погрешностью ± 10 м
Скорость аккумуляции и температура поверхности	Динамика ледников	Площадные данные об аккумуляции через 10–100 км (погрешность ± 5 см/год). Температура через 100 км (данные СВЧ- и ИК-радиометрии с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}/\text{год}$)
Сдвиговые напряжения на поверхности	Моделирование динамики ледников	Локализация отдельных точек со спутника с погрешностью ± 1 м и повторностью 5–10 раз в год (по лазерному отражателю)
Таяние на поверхности	Баланс массы и энергии	СВЧ-радиометрия летом, 1–3 раза в околополуденные часы (опрос наземных станций со спутника)
Откальвание айсбергов	Вариации в зависимости от гидрологических условий	Анализ откальвания айсбергов по спутниковым изображениям РБО. Оценка региональной продукции с погрешностью $\pm 10\%$

голубых звезд (ночью) в интервале 115–430 мкм с разрешением 0.12 нм (излучение звезд служит стандартом для сравнения). Каждая серия измерений может продолжаться от 1 с до 12 мин при изменении спектральной полосы пропускания от 0.1 до 5 нм.

9. Монитор частиц в окружающей среде (РЕМ) обеспечит измерения заряженных частиц (их типа, количества и энергии), вторгающихся в термосферу, мезосферу и стратосферу. Он состоит из трех установленных на выдвигной мачте блоков для измерений электронов (энергии 1–5 эВ), протонов (1 эВ–150 МэВ) и магнитного поля Земли. Имеется также 16-элементный набор датчиков для измерений рентгеновского излучения, а также получения рентгеновских изображений в диапазоне энергий 2–50 кэВ.

Две наиболее важные проблемы привлекают внимание в связи с изучением полярных ледников в формировании климата [92]:

Таблица 3.10

Требования к данным наблюдений ледяного покрова

Наблюдаемая величина	Цель наблюдений	Требования к аппаратуре и данным наблюдений
Положение границ ледяного покрова	Изучение характеристик ледяного покрова, теплообмена между океаном и атмосферой	СВЧ-радиометры или РБО, радиовысотомер; ежедневно, погрешность $\pm 5-20$ км
Сплоченность льда	То же	Та же аппаратура, ежедневно для 10 % всей площади, погрешность около ± 10 %
Альbedo льда	” ”	Среднее площадное при шаге 25–100 км и погрешности ± 0.02
Движение льда	” ”	Смещение фиксированных точек с погрешностью ± 0.5 км/сут при пространственном разрешении 5–100 км, ежедневно
Тип и толщина льда	” ”	СВЧ-радиометры, РБО, скаттерометр, радиовысотомер, через 1 неделю
Торошение	” ”	РБО, данные Landsat, еженедельно
Полыньи	” ”	Та же аппаратура, ежедневно
Распределение ледяных полей	” ”	РБО, Landsat и др.; погрешность размера льдин ± 10 м, через 1–7 сут
Таяние на поверхности	” ”	СВЧ-радиометрия, ежедневно летом, а в зоне паковых льдов — круглый год
Температура поверхности льда	Воздействие термических возмущений	СВЧ- и ИК-радиометрия, данные буев как контрольные
Скорость ветра	То же	Скаттерометр, РБО, буи
Температура поверхности океана	” ”	СВЧ- и ИК-радиометрия, погрешность $\pm 1^\circ\text{C}$

1) оценки вклада ледников в гидрологический круговорот в системе „океан–атмосфера–ледники”; 2) анализ ледяных кернов с целью восстановления характеристик палеоклимата, а также вариаций содержания в атмосфере таких компонентов, как CO_2 , NO_x , SO_2 , аэрозоль и др., за последние 200 тысяч лет. Приближенные оценки показали, что изменчивость ледников, обусловленная внутренними факторами и режимом температуры и осадков, может оказывать сильное воздействие на климат и уровень Мирового океана в масштабах времени от одного до нескольких столетий. Это определяет первостепенное значение исследований динамики ледников на основе численного моделирования и данных наблюдений.

Таблица 3.9 содержит сводку ориентировочных требований к данным наблюдений полярных ледников.

В связи с проблемой влияния морских льдов на климат большой интерес представляет изучение взаимодействия ледяного покрова с атмосферой, особенно при наличии полыней и разводий, когда взаимодействие радикально усиливается [52]. Подобное изучение должно опираться на применение имитационных интерактивных моделей системы „океан–ледяной покров–атмосфера” и использование комплексных данных наблюдений для проверки адекватности моделей. Таблица 3.10 характеризует требования к данным наблюдений наиболее существенных величин. Поскольку обсуждаемые наблюдения осуществляются в удаленных регионах, целесообразно использование специального спутника связи для передачи данных.

3.2. Система наблюдений Земли

Система наблюдений Земли (EOS) представляет собой рассчитанную на длительную перспективу многодисциплинарную программу изучения Земли как системы „атмосфера–гидросфера–криосфера–биосфера”, которая будет основана прежде всего на использовании данных спутниковых наблюдений с применением системы трех спутников, обслуживаемых персоналом постоянной орбитальной станции [70]. Начало функционирования системы запланировано на 1998 г. Программа EOS рассчитана на 15 лет. Для осуществления эффективной обработки и распространения данных спутниковых и обычных наблюдений потребителям будет создана наземная геоинформационная система, располагающая комплексом высокопроизводительных ЭВМ.

Спутники, размер которых примерно вдвое превосходит величину ранее запущенных природно-ресурсных космических аппаратов, должны быть выведены на солнечно-синхронную (угол наклона 98.7°) орбиту высотой 824 км, причем для двух спутников время пересечения экватора составит 13 ч 30 м (на восходящем витке), а для третьего 09 ч 30 м (на нисходящем витке). Орбитальные характеристики выбраны на основе компромисса в удовлетворении требований, предъявляемых различными задачами.

Две категории спутниковой аппаратуры предусматривают: 1) получение информации с целью глобального картирования параметров окружающей среды и биосферы с повторностью 2–3 сут при пространственном разрешении порядка нескольких километров; 2) получение данных с высоким разрешением (десятки метров) при ограниченном пространственном охвате для детального слежения за процессами в различных регионах. Разрабатываемый комплекс аппаратуры должен быть размещен на трех спутниках и включает 37 приборов. Таблица 3.11 содержит краткую характеристику предполагаемого аппаратурного комплекса. Окончательный выбор комплекса из 11 приборов НАСА сделала 18 января 1991 г. [111].

В соответствии с упомянутыми данными, система наблюдений Земли планируется как всеобъемлющая информационная система, анализ данных которой позволит понять функционирование Земли как природного комплекса, выявить пределы изменчивости этого комплекса, оценить его эволюцию в будущем [64]. Это означает, что EOS призвана обеспечить синхронные наблюдения в глобальных масштабах всех характеристик окружающей среды и биосферы, которые необходимы для интерактивного анализа динамики компонентов Земли как единой системы.

Как информационная система EOS включает три компонента: 1) комплексы научной аппаратуры на спутниках, выводимых на солнечно-синхронные полярные орбиты; 2) комплексы управления функционированием спутников; 3) системы передачи данных на наземные пункты обработки данных с целью получения физических величин, которые могут быть использованы для дальнейшего анализа и распространения данных.

С учетом комбинированного использования данных обычных и спутниковых наблюдений EOS позволит: 1) получить данные о совокупности взаимодействующих процессов, которые определяют эволюцию Земли как системы в различных пространственно-временных масштабах; 2) усовершенствовать имитационное численное моделирование и прогностические модели путем уточнения методик параметризации различных процессов на основе сравнения с данными наблюдений; 3) разработать эмпирические модели таких компонентов и процессов, для которых теоретическое обоснование пока что отсутствует; 4) предпринять исследования различных конкретных ситуаций, имеющих приоритетное значение; 5) выявить долговременные тренды и масштабы глобальных изменений, принимая во внимание результаты численного моделирования, раскрывающие приоритетность различных процессов и регионов. Беспрецедентные объем и разнообразие данных EOS определяют гораздо более высокую степень сложности проблем обработки, архивации и анализа данных по сравнению с созданием системы наблюдений.

Согласно [111], окончательное решение о выборе комплекса научной аппаратуры для трех спутников серии EOS-A (запуск первого спутника планируется на 1998 г.) определило следующую совокупность приборов:

1) ИК/СВЧ-зондировщик атмосферы (AIRS/AMSU-A/-B) для восстановления вертикального профиля температуры с погрешностью $\pm 1^\circ\text{C}$, а также для получения данных о содержании водяного пара, характеристиках облачного покрова и температуре подстилающей поверхности;

2) усовершенствованный радиометр для измерений теплового излучения и ИК-отражательной способности подстилающей поверхности в ИК-диапазоне (ASTER), предназначенный для получения изображений поверхности суши и облачного покрова при высоком

Таблица 3.11

Аппаратурный комплекс EOS

Целевое назначение	Приборы	Основные характеристики приборов	Область интерпретации данных
Получение изображений поверхности и дистанционное зондирование	Видеоспектрометр умеренного разрешения с наклонной осью (MODIS-T)	0.4–1.1 мкм, 64 канала, пространственное разрешение 1 км	Биогеохимические круговороты, цвет океана
	Видеоспектрометр, направленный в надир (MODIS-N)	0.4–1.1 мкм, 36 каналов, 0.5 км	Биогеохимические круговороты, температура
	Видеоспектрометр высокого разрешения (HIRIS)	0.4–2.2 мкм, 200 каналов, 30 м	Биогеохимические круговороты, геология
	Тепловой видеоспектрометр (TIMS)	3–5, 8–15 мкм, 9 каналов, 30 м	То же
	Многочастотный микроволновый радиометр высокого разрешения (HMMR)	1.4–91 ГГц, 6 каналов, 1.1 × 1.8 км на частоте 91 ГГц	Радиояркость температура поверхности океана и суши
	Лидарный зондировщик и высотомер (LASA)	Набор длин волн, диаметр приемного зеркала 1.25 м	Атмосферная коррекция, зондирование аэрозоля и облаков, высотометрия
Активное зондирование в радиодиапазоне (SAM)	Усовершенствованная система сбора и координатной привязки данных (ADCLS)	Точность привязки 2–5 км	Циркуляция океана (преимущественно данные морских буев)
	РЛС с синтезированной апертурой (SAR)	Полосы C, L, X на различных поляризациях, 30 м	Характеристики суши, растительного и ледяного покрова

Мониторинг физических и химических характеристик атмосферы (APACM)	Радиовысотометр (WALT)	Точность определения высоты около 10 см	Топография поверхности
	Скаттерометр	Точность восстановления скорости ветра около ± 2 м/с	Сдвиг ветра у поверхности океана
	Корреляционный радиометр	Подлежат уточнению	Восстановление вертикальных профилей концентрации CO, NH ₃
	Фурье-спектрометр, направленный в надир	„ „	Восстановление NO ₃ , CH ₄ , H ₂ S
	Лидарный зондировщик-высотометр	„ „	Профили температуры, давления, водяного пара, озона в тропосфере
	Доплеровский лидар	„ „	Ветер в тропосфере
	ИК-радиометр	„ „	„Лимбовое” зондирование O ₃ , N ₂ O и др.
	Радиометр с модуляцией давлением	„ „	То же для CFC1 ₃ и др.
	Субмиллиметровый спектрометр	„ „	То же для OH, HCl и др.
	Микроволновый „лимбовый” зондировщик	„ „	Зондирование газового состава атмосферы
Спектрометр для видимой и УФ-областей спектра	„ „	„Лимбовое” зондирование ClO, O ₃ и др.	
Интерферометр Фабри–Перо	„ „	Профили ветра и температуры	
Криогенный фурье-спектрометр	„ „	То же	
Мониторы	Солнечной постоянной	Подлежат уточнению	
	Частиц и полей	„ „	
	Радиационного баланса Земли	„ „	

разрешении (около 20 м) с целью решения разнообразных задач в области климатологии, гидрологии, биологии и геологии;

3) аппаратура CERES для измерений радиационного баланса Земли и его компонентов;

4) сканирующий поляриметр (EOSP) для изучения атмосферного аэрозоля и облачного покрова;

5) лимбовый зондировщик высокого разрешения (HIRDLS), данные которого должны служить источником информации для восстановления вертикальных профилей концентрации озона и „парниковых” газов (водяной пар, галогеноуглеродные соединения, окислы азота и др.);

6) датчик для мониторинга молний (LIS) с целью изучения динамики грозовой активности;

7) многоугловой видеоспектрометр (MISR) для получения данных о характеристиках подстилающей поверхности, облаков и аэрозоля;

8) видеоспектрометр умеренного разрешения (MODIS-N/T), состоящий из двух видеоспектрометров, направленных в нади́р (MODIS-N) и под углом к вертикали (MODIS-T); цель – изучение физических и биологических процессов в атмосфере, океане и на поверхности суши;

9) скаттерометр (STIKSAT) для получения данных о ветре у поверхности океана.

Условно включены в этот список:

10) многочастотный видео-СВЧ-радиометр (MIMR), разработанный сотрудниками Европейского космического агентства главным образом для изучения глобального круговорота воды;

11) разработанная канадскими специалистами аппаратура MOPITT для получения данных о содержании окиси углерода и метана в атмосфере.

При наличии возможности будут использованы также монитор солнечной постоянной (ACRIM) и HIRIS (см. табл. 3.11). Остальные упомянутые в табл. 3.11 приборы рассматриваются как возможные кандидаты для спутников серии EOS-B.

3.3. Международный год космоса

Объявление 1992 г. Международным годом космоса (МГК) определило возросшую актуальность космических исследований и широкие перспективы их дальнейшего развития. Не вызывает сомнений, что МГК должен стать кульминацией в тех областях космических исследований, которые являются наиболее актуальными сейчас и должны приобрести еще большее значение в ближайшие годы. В этой связи представляется бесспорным, что в конце XX в. нет более актуальной проблематики, чем экологическая. Широкий диапазон проблем: от тех, что проявляются в повседневной жизни людей (это прежде всего касается загрязнения природной среды), до экологии планеты в целом – отображает острогу ситуации.

Развитие космической экологии (в контексте МГК) должно опираться на осуществление долговременной международной программы наблюдений Земли из космоса с обеспечением эффективной координации разработок и стандартизации (унификации, сравнимости и т. п.) получаемой информации. Решению этой задачи благоприятствует успешное осуществление в 1991–1992 гг. таких миссий, как европейский (ERS-1) и японский (JERS-1) природно-ресурсные спутники, дальнейшее развитие таких наших систем, как „Космос”, „Метеор”, „Метеор-природа”, „Ресурс”. Важное значение имеют предстоящие функционирование природно-ресурсного модуля орбитальной станции „Мир”, разработки (совместно с Францией) с целью измерений радиационного баланса Земли (программа SCARAB) и лидарного зондирования атмосферы (программа „Алиса”), исследования (совместно с США) слоя озона (с использованием американской аппаратуры TOMS). Широкие перспективы открывает совершенствование аппаратурных комплексов, устанавливаемых на спутниках серий NOAA, SPOT, Landsat, запуск индийского природно-ресурсного спутника IRS-1, дальнейшее развитие метеорологических и природно-ресурсных спутниковых наблюдений в КНР, разработки в рамках франко-американской программы TOPEX/POSEIDON, запуск американского спутника UARS для исследований верхних слоев атмосферы, запуски спутников ADEOS (Япония) и MECB (Бразилия) и др.

Все это позволит получать разнообразную информацию, которая характеризует спектральную и интегральную солнечные постоянные, структуру магнитного и электрического полей Земли, поступление частиц в атмосферу, ветер в термосфере, мезосфере и стратосфере, состав и температуру тропосферы, стратосферы и мезосферы (включая общее содержание и вертикальный профиль концентрации озона), облачный покров и атмосферный аэрозоль, компоненты радиационного баланса Земли, снежный и морской ледяной покров, цвет океана (содержание фитопланктона), растительный покров, ветланды, минеральный состав и температуру поверхности, волнение и скорость ветра у поверхности океана, морские течения, топографию поверхности суши и океана, вулканические извержения, динамику земной коры и др.

Находятся в стадии разработки или требуют существенного совершенствования методики восстановления параметров, характеризующих поля концентрации в стратосфере и мезосфере таких малых газовых компонентов, как соединения NO_x , HCl , CO , NO_x , HFC и др., а также аэрозоля, вертикальный профиль температуры с разрешением по высоте порядка 1 км (при погрешности восстановления около 1°C), поле ветра в тропосфере, осадки, водо- и ледосодержание облаков, высота пограничного слоя атмосферы, видовое разнообразие фитопланктона и биологию озер, свойства снежного покрова, физиологические свойства растительности, типы почв и минеральный состав горных пород, спектры морского волнения, влажность почвы, процессы мезомасштабной геодинамики, гравитационное поле и др.

Получение упомянутой и другой информации позволит приступить к решению широкой совокупности задач, связанных с изучением динамики природных процессов в региональных и глобальных масштабах. Следует, однако, иметь в виду, что во всех случаях необходимы подспутниковые комплексные наблюдения на ключевых участках (КУ), характеризующих типичные природные системы (речные системы, системы „озеро–водосбор”, различные экосистемы и т. п.). Опыт соответствующих разработок в области географии имеет в этой связи неocenимое значение.

3.3.1. Приоритетные исследования

Что касается приоритетов, то несомненно, что на первое место следует поставить проблему динамики глобальной биосферы. Первостепенной важности задача – картирование (в глобальных масштабах) первичной продуктивности и биомассы, причем первым этапом этой задачи может быть оценка валовой (чистой) первичной продукции и биомассы в бореальных и тропических лесах. Последние являются, как известно, тем регионом земного шара, который вносит главный вклад в биоразнообразии биосферы и, с другой стороны, играет важную роль в формировании глобальных биогеохимических круговоротов, изучение которых составляет ключевой аспект МГБП. Тесно примыкает к обсуждаемой проблематике исследование опустынивания.

Исследования глобальных трехмерных полей химически и (или) оптически активных малых газовых компонентов атмосферы и аэрозоля представляют большой интерес как с точки зрения динамики биосферы, так и в связи с анализом факторов формирования и возможной изменчивости парникового эффекта атмосферы, оказывающей воздействие на климат. Еще один аспект этой проблематики – глобальная динамика слоя озона. Тесно примыкают к рассматриваемой взаимосвязанной проблематике исследования глобальных круговоротов воды и энергии. Детальный анализ содержания этого аспекта глобальной экологии содержится в программе Эксперимента по глобальным круговоротам воды и энергии (ГЭВЭКС), являющейся частью Всемирной программы исследований климата (ВПИК).

Главными целями ГЭВЭКС являются [68, 94]: 1) описание и выявление закономерностей переноса воды (парообразной, жидкой и твердой), а также потоков энергии в глобальной атмосфере и на уровне подстилающей поверхности; 2) разработка методов прогноза природных и антропогенных изменений распределения воды во всех трех фазах в атмосфере и на уровне поверхности. Достижение этих целей

потребуется совершенствования разнообразных средств наблюдений, в том числе спутниковой аппаратуры.

Осуществление ГЭВЭС позволит сделать важный шаг вперед в изучении изменений, происходящих в окружающей среде, в глобальных масштабах на основе совершенствования глобальной системы наблюдений. Выбор периода для осуществления ГЭВЭС 1995–2000 гг. определяется следующими обстоятельствами: 1) обостряющейся актуальностью проблемы глобальных изменений, ключевыми аспектами которой являются исследования биогеохимических круговоротов, общей циркуляции атмосферы и океана, круговоротов энергии и массы; 2) готовностью новых средств спутниковых наблюдений атмосферы и океана к 1995–2000 гг. (это особенно относится к активному лидарному и радиолокационному зондированию); 3) ожидаемым серьезным прогрессом в достижении еще более высокой производительности ЭВМ.

Существующая система наблюдений страдает целым рядом недостатков, к числу которых принадлежат: 1) недостаточная репрезентативность глобального массива данных по трехмерному полю ветра (особенно над Индийским океаном); 2) серьезные неопределенности данных об осадках над сушей и практическое отсутствие такого рода данных над океаном; 3) существенная неадекватность глобальных массивов данных по трехмерным полям влагосодержания и облачности; 4) крайне ограниченный объем информации о радиационном балансе и оптических свойствах подстилающей поверхности в глобальных масштабах; 5) скудость количественной географической информации о землепользовании, типах и свойствах растительного покрова и др.

Требования к данным спутниковых наблюдений определяют необходимость использования геостационарных и низкоорбитальных спутников. Необходимы, в частности, пять геостационарных спутников с установленной на них аппаратурой: 1) многоспектральной аппаратурой для видимого и ИК-диапазонов, обеспечивающей получение как изображений высокого пространственного разрешения, так и количественных данных о полях яркости на различных длинах волн; 2) аппаратурой дистанционного зондирования среднего разрешения в ИК- и СВЧ-диапазонах, которая допускает восстановление трехмерных полей температуры, влаго- и водосодержания.

Что касается низкоорбитальных спутников, то необходимо не менее двух полярно-орбитальных (при высоте около 800 км) солнечно-синхронных спутников, а также планируется запуск орбитальной станции с отдельными платформами на почти экваториальной (30°) орбите. В комплекс аппаратуры низкоорбитальных спутников войдут: 1) метеорологический блок оперативного назначения (получение изображений и дистанционное зондирование, сбор информации с различных автоматизированных платформ); 2) блок аппаратуры для получения данных о структуре облачного покрова и поле ветра (лидарный

высотомер, многоспектральный радиометр, позволяющий получать стереографические изображения облаков, скаттерометр для восстановления ветра или сдвига ветра у поверхности океана, доплеровский лидар для получения данных о ветре в безоблачной атмосфере); 3) блок СВЧ-аппаратуры для получения сведений об осадках (многоканальный сканирующий СВЧ-радиометр с широкой полосой обзора, включающей низкочастотный канал в полосе С для восстановления влажности почвы; радиолокационная станция (РЛС) на частотах 10–15 и 35 ГГц, обеспечивающая определение интенсивности осадков при высоком пространственном разрешении; целесообразны два типа РЛС – радиолокатор с большой антенной на орбитальной станции, обеспечивающей полосу обзора 200 км при сохранении высокого (0.5 км) разрешения по высоте, и более компактная РЛС на полярно-орбитальных спутниках для распознавания зон дождящих облаков); 4) блок аппаратуры для измерений компонентов радиационного баланса Земли (РБЗ), включающий усовершенствованные датчики РБЗ, применявшиеся ранее, узкополосные (в полосах H_2O , CO_2 и др.) радиометры для оценки влияния облачности и „парниковых” газов на РБЗ, лидар для восстановления высот верхней границы облаков и пограничного слоя атмосферы, многоспектральный радиометр для получения изображений умеренного разрешения, многоканальный ИК-радиометр с несколькими полями зрения (вдоль трассы спутника) для восстановления температуры поверхности океана.

В контексте наук об атмосфере представляют интерес рекомендации Комитета по долгосрочному планированию развития наук об атмосфере, созданного Национальным научным фондом (ННФ) США и Университетской корпорацией атмосферных исследований (УКАИ), который определил как приоритетные на период 1989–1994 гг. следующие четыре направления разработок с целью изучения глобальных изменений в атмосфере [99]: 1) Программа по химии глобальной тропосферы (ПХГТ); 2) Мезометеорологические исследования (ММИ); 3) Программа по изучению тропических океанов и глобальной атмосферы (ТОГА); 4) Процессы взаимодействия энергетики и динамики отдельных регионов атмосферы (ПВДА).

Что касается ПХГТ, то ее главной целью является (в течение первого десятилетия осуществления программы) обоснование прогноза возможных изменений химии глобальной атмосферы в следующем столетии, особенно с точки зрения вклада атмосферы в формирование биогеохимических круговоротов, а также оценки факторов, влияющих на окислительные и радиационные свойства атмосферы. Пять взаимосвязанных областей разработок имеют первостепенное значение: 1) глобальные распределения и тренды компонентов состава атмосферы; 2) роль биологических процессов и взаимодействия с подстилающей поверхностью; 3) газофазные фотохимические реакции; 4) многофазные процессы; 5) теоретические исследования и имитационное моделирование. К числу наиболее актуальных направлений

исследований принадлежат (в порядке приоритетности): взаимодействующие компоненты климатической системы; внезапные изменения климата; мониторинг климатической системы; солнечно-земные связи; физика облаков и осадков; численные долгосрочные прогнозы погоды; физика Солнца.

Ключевыми аспектами ММИ являются: 1) понимание природы конвекции в кучевых облаках и мезомасштабных конвективных систем, а также их взаимодействия с крупномасштабными процессами; 2) влияние мезомасштабных потоков энергии, влаги и количества движения на синоптические процессы и изменчивость климата; 3) взаимодействие мезомасштабных систем с топографией, экосистемами, процессами в пограничном слое, радиационными потоками, испарением и конденсацией, воздействие масштабных процессов на химию атмосферы в региональных и глобальных масштабах, а также на местный климат.

Основной целью ТОГА являются исследования природы и степени предсказуемости взаимодействия тропических океанов и общей циркуляции атмосферы в масштабах времени от недель до нескольких лет, а также использование результатов подобных исследований для разработки краткосрочных прогнозов климата.

Анализ процессов взаимодействия энергетики и динамики нейтральной и ионизированной верхней атмосферы – от мезосферы до экзобазы (50–500 км) – составляет главную задачу ПВДА, включающую рассмотрение механизмов солнечно-земных связей.

Особый интерес представляет обоснование глобальной системы наблюдений климата. Как уже отмечалось, обобщение присланных по запросу Всемирной метеорологической организации (ВМО) мнений метеослужб 50 стран привело к следующему ранжированию факторов межгодовой изменчивости климата [28]: 1) взаимодействие атмосферы и океана; 2) уничтожение лесов, солнечная активность; 3) изменчивость протяженности снежного и ледяного покрова; 4) другие факторы (урбанизация, CO_2 , аэрозоль, опустынивание, стратосферный аэрозоль, влажность почвы). В масштабах десятилетий приоритетность оказывается следующей: 1) CO_2 ; 2) уничтожение лесов; 3) урбанизация, взаимодействие океана и атмосферы; 4) другие факторы (аэрозоль, солнечная активность, опустынивание, вулканические извержения, стратосферный озон, антропогенные выбросы тепла, снежный и ледяной покров).

К числу приоритетных параметров атмосферы, требующих обобщения в форме глобальных полей, принадлежат: температура воздуха (абсолютные значения и аномалии) и атмосферное давление на уровне моря (аномалии); осадки (абсолютные значения и аномалии); поле ветра или линий тока у поверхности (в тропиках); распределение облачности; высоты уровней 500 и 200 гПа (аномалии); относительная топография 500–1000 гПа (аномалии); поля ветра или линий тока на уровне 200 гПа (в тропиках).

Таблица 3.12

Сводка существующих и перспективных возможностей применения аэрокосмических данных при гидрологическом моделировании

Фактор	Возможности использования данных спутникового дистанционного зондирования		
	существующие	ближайшие перспективы	дальние перспективы
Осадки	<p>Пространственная протяженность зон и продолжительность осадков; приближенные оценки интенсивности осадков по характеристикам облачного покрова</p> <p>Наземные метеорологические радиолокаторы (МРЛ) позволяют проследивать распределение и определять интенсивность осадков</p>	<p>Использование спутниковых данных об интенсивности осадков для экстраполяции точечных наземных осадкомерных данных</p> <p>Совместные данные спутников и МРЛ – обеспечение информации для прогноза паводков</p>	<p>Применение спутниковых МРЛ для получения данных о пространственно-временной изменчивости осадков</p> <p>Внедрение наземных автоматизированных поляризационных и доплеровских МРЛ для более точного определения интенсивности осадков</p>
Снежный покров	<p>Картирование протяженности снежного покрова, осложненное трудностями различения снега и облачности, а также оценки заснеженности лесов</p> <p>Слежение за таянием озерных льдов</p>	<p>Использование канала 1.55–1.75 мкм для повышения разрешающей способности и более надежного различения снега и облаков при построении средних месячных карт снежного покрова</p> <p>Региональное распределение снежного покрова, оценки водного эквивалента и начала снеготаяния по СВЧ-данным</p>	<p>Применение СВЧ- и ИК-датчиков для оценки толщины (водного эквивалента) снежного покрова. Учет влияния топографии и растительного покрова</p> <p>Использование многовременных и многоспектральных данных для картирования различных характеристик снежного покрова</p>
Облачный покров	<p>Надежная информация о протяженности и типах облачного покрова</p>	<p>Автоматизированное картирование условий облачности с использованием многоспектральных данных</p>	<p>Применение лидарного зондирования для определения высоты верхней границы облаков и многоканальной СВЧ-аппаратуры для определения влаго- и водо-содержания</p>
Землепользование	<p>Пространственно-усредненная информация о землепользовании для ограничения числа категорий</p> <p>Аэросъемка как контроль качества картирования по спутниковым данным</p>	<p>Детальное распознавание категорий и картирование землепользования</p> <p>Автоматизированная классификация природных образований</p>	<p>Совершенствование средств наблюдений и создание геосистемных данных</p> <p>Оперативные спутниковые данные высокого разрешения для получения информации об изменениях в бассейнах водосбора в почти реальном масштабе времени и обновления геосистемных баз данных</p>
Гидрогеометрия рек и долин	<p>Получение данных в безлесных (методики фотограмметрии) и залесенных (самолетные лазерные системы) районах</p>	<p>Совершенствование самолетной аппаратуры для построения топографических карт</p>	<p>Самолетные лазерные системы для картирования трехмерного рельефа, в том числе разрезов речных долин</p>
Влажность почвы	<p>Качественная оценка влажности поверхностного слоя почвы</p>	<p>Оперативное картирование влажности почвы по СВЧ-самолетным и спутниковым данным</p>	<p>Детальное картирование влажности почвы в почти реальном масштабе времени с использованием спутниковой пассивной и активной радиолокации</p>

Таблица 3.12 (продолжение)

Возможности использования данных спутникового дистанционного зондирования		дальние перспективы	
Фактор	существующие	ближайшие перспективы	
Поверхностные воды	Отрицательное картирование прибрежных границ водоемов и суши (точное определение границ возможно влиянием лесов)	Повышение разрешающей способности спутниковых данных для точного определения границ водоемов и суши. Данные РВО на длинах волн 21—25 см с целью повышения точности картирования зон затопления в лесах	Картирование последствий наводнений в почти реальном масштабе времени на основе использования усовершенствованных средств обработки данных
Эвапотранспирация	Грубые оценки по данным об облачности и растительном покрове	Уточненные оценки эвапотранспирации с использованием многоспектральных данных и метеорологической информации	Автоматизированное картирование эвапотранспирации в почти реальном масштабе времени с использованием данных многоканального зондирования атмосферы и почвы

Приоритетными параметрами океана являются: температура поверхности океана (ТПО; аномалии); скорость ветра у поверхности (усредненный вектор касательного ветрового напряжения); теплозапасы поверхностного слоя океана (в определенных районах). Первостепенное значение имеют данные наблюдений уходящей длинноволновой и коротковолновой радиации (радиационного баланса Земли). Наиболее важными характеристиками криосферы являются: протяженность континентального снежного и морского ледяного покрова; флуктуации ледников.

Перечисленные величины необходимо представлять в форме временных рядов, но важна также подробная информация о следующих параметрах: средние глобальные уровни концентрации оптически активных малых газовых компонентов атмосферы (озон, углекислый газ, окислы азота, фреоны, метан и др.); внеатмосферная солнечная радиация; уровень поверхности океана (в определенных районах). Важны также временные ряды таких приоритетных индексов климатической системы: индекс Южного колебания, характеристики осцилляций Атлантического и Тихого океанов в северном полушарии: индексы зонального переноса, блокирования и пассатов; амплитуда и фаза квазидвухлетних осцилляций в стратосфере; различные индексы, описывающие дистанционные связи в тропосфере.

Требуют особого внимания следующие типичные особенности климата: струйные течения, преобладающие траектории циклонов, системы пассатов, ВЗК, центры действия (Алеутский и Исландский минимумы, субтропические пояса высокого давления). Значительный прогресс в разработке спутниковых методик дистанционной индикации определяет перспективы слежения за растительным покровом, зонами осадков, стратосферным аэрозолем (особенно вулканического происхождения), толщиной полярных льдов, течениями в океане, альбедо поверхности и инсоляцией.

С точки зрения физических основ климата первостепенное внимание привлекают: перенос скрытого и явного тепла на границе раздела подстилающая поверхность—атмосфера; высвобождение скрытого тепла в зонах осадков; взаимодействие радиации и облаков, а также малых оптически активных газовых и аэрозольных компонентов; круговорот влаги; замутненность атмосферы и др.

На основе анализа различных гидрологических моделей Л. Линк [82] обсудил возможности использования данных аэрокосмического дистанционного зондирования при гидрологическом моделировании. Таблица 3.12 содержит сводку имеющихся в настоящее время возможностей получения данных для гидрологического моделирования, а также ближайших и более далеких перспектив в этой области. Приоритетное значение имеет в этой связи совершенствование методик восстановления интенсивности осадков и характеристик снежного покрова (протяженность, толщина, плотность, водный эквивалент).

Наиболее существенное преимущество использования спутниковой информации состоит в возможности располагать пространственными

распределениями параметров (типы природных образований и землепользования, гидрогеометрия рек и долин, дренажная сеть). Первоочередной важности параметрами являются влажность почвы и эвапотранспирация. Пока что использование спутниковой информации не обеспечило заметного повышения надежности гидрологического моделирования ввиду недостаточного пространственного разрешения спутниковых данных, но несомненно, что усовершенствование спутниковой аппаратуры приведет к радикальному изменению этой ситуации. Важно, однако, осуществление такого развития гидрологических моделей, которое обеспечит совместимость моделей со спецификой спутниковой информации.

Отдельный раздел должны составить исследования Мирового океана, включающие как процессы в самом океане (динамика, термика, химия и биология океана), так и, в особенности, процессы взаимодействия между океаном и атмосферой (в первую очередь с точки зрения вклада этого взаимодействия в формирование глобальных биогеохимических круговоротов). Естественно, что в этой связи следует прежде всего опираться на такие уже осуществляемые программы, как, например, являющиеся компонентами ВПИК Программа изучения тропической и глобальной атмосферы (ТОГА), а также Эксперимент по изучению глобальной циркуляции океана (WOCE).

Многочисленность и разнообразие задач, гигантский объем и высокая стоимость спутниковой информации определили необходимость системного подхода к планированию МКГ. Необходима прежде всего разработка целостной и обладающей четкими приоритетами программы исследований (материалы [25–30] можно рассматривать лишь как исходное приближение). Эта программа должна составить основу для планирования оптимальной глобальной системы спутниковых экологических наблюдений с учетом информационной ценности различных типов наблюдений, определяемой приоритетами. При этом требуют обоснования не только выбор совокупности измеряемых величин, но и требования к пространственно-временному разрешению. Достаточно надежным инструментом для обоснования подобных требований могут быть лишь имитационные численные модели изучаемых процессов и явлений.

Исключительной важности проблема – обеспечение стандартизации, архивации и доступности всех данных наблюдений, что потребует создания региональных и глобальных геоинформационных систем.

Следует подчеркнуть, что выполнена большая работа по подготовке к МКГ.

3.3.2. Подготовка к осуществлению программы МКГ

Международное совещание, состоявшееся в Дурхеме (штат Нью-Гемпшир, США) с 18 апреля по 1 мая 1988 г., приняло решение о создании Форума космического агентства по Международному году космоса

(SAFISY), в составе которого образованы два инициативных комитета: 1) по наукам о Земле и технологиям (КНЗТ); 2) по проблемам образования и использованию спутниковой информации. С 27 февраля по 1 марта 1989 г. в Абингдоне (Великобритания) по инициативе НАСА и при поддержке Британского национального космического центра состоялась первая сессия КНЗТ, главной целью которой была разработка программ использования данных, которые могут быть получены в период Международного года космоса. Соответствующие предложения были рассмотрены позднее на пленарной сессии SAFISY, состоявшейся 2–3 мая 1989 г. во Фраскати (Италия), где расположен Информационный центр европейских космических исследований.

КНЗТ принял решение о разделении всей его работы на три категории и образовал соответствующие рабочие группы (РГ): 1) спутниковые данные для анализа глобальных изменений окружающей среды и биосферы (РГ-1); 2) испытания глобальной информационной системы (РГ-2); 3) распространение знаний о глобальных изменениях (РГ-3).

Задача РГ-1 состоит в выявлении (на конкретных примерах) значения спутниковой экологической информации для оценки долговременных изменений в окружающей среде и биосфере, имея в виду как приоритетные следующие проблемы: 1) глобальные последствия изменений растительного покрова суши (это касается главным образом сведения лесов); 2) парниковый эффект атмосферы; 3) взаимосвязи океан–климат; 4) полярные „озонные дыры” [28].

Глобальная динамика растительного покрова. Что касается проблемы вырубki лесов, то главная цель состоит в том, чтобы оценить тренды изменчивости для различных регионов земного шара и их значение с точки зрения воздействия на глобальный климат, биогеохимические круговороты, динамику, экосистемы и биоразнообразие. С этой целью могут быть использованы данные спутников SPOT, Landsat, „Метеор”, „Космос”, орбитальной станции „Мир”, усовершенствованного радиометра очень высокого разрешения (AVHRR), устанавливаемого на спутниках NOAA, для отдельных ключевых участков (КУ). Важное значение имеет в связи с этим обеспечение наземной калибровки бортовой аппаратуры и сравнимости данных наблюдений, накопление достаточно длинных (по крайней мере за 10 лет) рядов данных, разработки алгоритмов восстановления и численных имитационных моделей. Основным результатом, который планировалось достигнуть в 1992 г., должен выразиться в составлении ежегодных тематических карт для избранных регионов за период с 1975 по 1992 г., характеризующих изменения свойств поверхности суши, а также в накоплении массива цифровой информации.

Парниковый эффект. Главной задачей разработок по проблеме парникового эффекта является выработка программы Международного эксперимента по обнаружению усиления парникового эффекта (GEDEX), имея в виду однозначное распознавание проявлений его интенсификации (прежде всего с точки зрения воздействия на климат глобальный). Хотя анализ данных наблюдений приземной

температуры воздуха за последнее столетие не дал однозначного доказательства проявления парникового эффекта в повышении средне-глобальной температуры, несомненным является рост концентрации таких „парниковых” газов, как CO_2 , метан, хлорфторуглеродные соединения. Стратегия обнаружения проявлений интенсификации парникового эффекта должна опираться на совместный анализ результатов численного моделирования, которые позволят обосновать наиболее репрезентативные сигнатуры, и данные наблюдений. Разумеется, решение проблемы распознавания „сигнала CO_2 ” требует, в частности, отфильтровывания вкладов в изменение температуры таких факторов, как солнечная активность и вулканические извержения.

Взаимосвязи океан – климат. В этом случае главной целью является использование спутниковой информации для изучения воздействия на климат процессов в океане и криосфере, а также анализ адекватности (с этой точки зрения) полученной информации. Особого внимания требуют: зоны перехода от устойчивого полярного ледяного покрова к открытой поверхности океана; распределение температуры поверхности океана в тропиках; взаимодействие атмосферы и океана в энергоактивных зонах; биопродуктивность Мирового океана.

Озонные „дыры” в полярных регионах. Они должны изучаться на основе совместного анализа данных обычных и спутниковых наблюдений для калибровки и оценки надежности спутниковой аппаратуры, а также изучения процессов в высокоширотной стратосфере, планируется осуществление в Арктике и в Антарктике в 1992–1993 гг. международных экспедиций с использованием наземных, самолетных и баллонных средств наблюдений. Важное значение для реализации этой программы имеет широкая доступность данных спутника UARS, запуск которого осуществлен в 1991 г.

Усилия РГ-2, связанные с испытаниями глобальной системы данных (GIST), были сосредоточены на решении задач в области исследований: биопродуктивности Мирового океана; скорости обезлесивания; изменения температуры поверхности Мирового океана; динамики полярного ледяного покрова. Во всех этих случаях важное значение имеет использование комбинированной обычной и спутниковой информации, имея в виду сбор, калибровку, анализ качества и распознавание данных. Целями GIST являются: стимулирование международного сотрудничества для совместного анализа данных наблюдений; создание условий для широкого доступа к архивам данных; информирование широких кругов специалистов о наличии данных, которые могут быть использованы не только в научных разработках, но и для решения различных задач социально-экономического развития. РГ-2 наметила осуществление четырех проектов, посвященных решению упомянутых выше задач.

Биопродуктивность Мирового океана. Исследования в этом направлении должны быть сосредоточены: 1) на получении,

архивации и анализе глобальной информации о содержании хлорофилла (фитопланктона) в верхнем слое Мирового океана, полученной по данным наблюдений при помощи установленного на спутнике „Нимбус-7” сканера цвета береговой зоны (СЦБЗ) и другой аналогичной аппаратуры; 2) на обосновании алгоритмов восстановления содержания хлорофилла и их последующем использовании для обработки данных подготовленной для спутника „Landsat-6” аппаратуры SEAWIFS и другой аналогичной спутниковой аппаратуры, которую предполагается применять в ближайшем будущем. Широкоугольная аппаратура для многоканальных измерений яркости поверхности водных бассейнов SEAWIFS при высоком пространственном (1 км) и временном разрешении предназначена для получения данных о содержании фитопланктона и обладает большим числом каналов по сравнению с СЦБЗ, что позволяет одновременно осуществлять надежную атмосферную коррекцию. Корректная интерпретация данных SEAWIFS требует различной вспомогательной информации, особенно сведений о скорости ветра у поверхности океана, волнении и морских течениях, которые оказываются возможным получить при помощи установленных на спутнике ERS-1 скаттерометра и радиовысотометра (запуск этого спутника осуществлен 17 июля 1991 г.). Целый ряд рабочих научных совещаний, намеченных на ближайшие несколько лет, позволит решить проблему алгоритмов восстановления, а в 1992 г. — получения первого репрезентативного глобального массива данных по содержанию фитопланктона, а также полям ветра и волнения.

Скорость обезлесивания. В данном случае главной целью является глобальная инвентаризация лесов и слежение за их динамикой по данным как существующих, так и планируемых спутников. В этой связи важно, что сотрудники НАСА осуществляют с 1982 г. накопление глобального массива помесячно усредненных значений нормированного дифференциального вегетационного индекса (NDVI), что позволило к 1992 г. располагать десятилетним рядом наблюдений (особое внимание привлекают проблемы вырубки тропических лесов и лесных пожаров).

Температура поверхности океана (ТПО). Получение и накопление данных по ТПО определяются их большой ролью в решении проблем численного моделирования глобальных циркуляций атмосферы и океана. В связи с этим имеется в виду: 1) повысить надежность и репрезентативность данных по ТПО; 2) реализовать методику обоснования комплексного архива данных по ТПО с обеспечением их взаимокалибровки; 3) создать региональные массивы высоконадежных данных; 4) усовершенствовать алгоритмы восстановления ТПО. Конечная цель состоит в накоплении репрезентативного глобального массива данных по ТПО.

Динамика полярного ледяного покрова. Это направление разработок предусматривало получение спутниковой информации (прежде всего по данным ERS-1 и JERS-1; запуск последнего

осуществлен в 1992 г.) с целью анализа закономерностей годового хода протяженности ледяного покрова в Арктике и Антарктике, а также крупномасштабной динамики ледяного покрова, отображаемой, в частности, дрейфом льдов и айсбергов. Основной вклад в получение подобной информации внесут средства пассивной и активной радиолокации. В 1992 г. планируется завершить формирование репрезентативного глобального массива данных.

Перед РГ-3 поставлена задача представления глобальных массивов спутниковой информации в форме, доступной для широких кругов населения. С этой целью была предпринята подготовка „энциклопедии” и атласа, описывающих глобальные изменения окружающей среды и биосферы. Эти издания содержат сведения об изменениях поверхности суши и морской биоты как в региональных, так и в глобальных масштабах.

В связи с обсуждаемой проблематикой исключительно важное значение приобретает обеспечение сравнимости, универсальности форматов и широкой доступности данных. Это требует выработки соответствующих рекомендаций и публикаций каталогов данных, что обусловило разработку проекта, посвященного проблеме создания глобального справочного массива данных, который содержал бы сведения о растительном покрове, состоянии поверхности суши и океана, влажности у поверхности и в свободной атмосфере, уровне Мирового океана, снежном и ледяном покрове, цвете океана, характеристиках атмосферы и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арманд Н. А., Крапивин В. Ф., Мкртчян Ф. А. Методы обработки данных радиофизического исследования окружающей среды. М.: Наука, 1987. 271 с.
2. Аэрозоль и климат / Под ред. К. Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 542 с.
3. Беляев В. И., Худошина М. Ю. Основы логико-информационного моделирования сложных геосистем. Киев: Наукова думка, 1989. 160 с.
4. Биогеохимический круговорот веществ в биосфере / Под ред. В. А. Ковды. М.: Наука, 1987. 143 с.
5. Биосфера: эволюция, пространство, время. М.: Прогресс, 1988. 464 с.
6. Большаков В. Н. Экологическое прогнозирование. М.: Знание, 1983. 37 с.
7. В. И. Вернадский и современность / Под ред. Б. С. Соколова и А. Л. Яншина. М.: Наука, 1986. 390 с.
8. Вернадский В. И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1987. 340 с.
9. Виноградов М. Е. О современных задачах изучения экосистем океана // Вестн. АН СССР. 1990. № 1. С. 88–97.
10. Владимирский Б. М., Кисловский Л. Д. Космические воздействия и эволюция биосферы // Новое в жизни, науке и технике. Космонавтика и астрономия. М.: Знание, 1986. № 1. 64 с.
11. Войткевич Г. В., Бессонов О. А. Химическая эволюция Земли. М.: Недра, 1986. 212 с.
12. Герасимов И. П. Экологические проблемы в прошлой, настоящей и будущей географии мира. М.: Наука, 1985. 248 с.
13. Горшков В. Г. Энергетика биосферы и устойчивость состояния окружающей среды // Итоги науки и техники. Теоретические и общие вопросы географии. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 7. 238 с.
14. Горшков В. Г., Кондратьев К. Я. Принцип Ле Шателье в биосфере // Экология. 1990. № 1. С. 7–16.
15. Горшков В. Г., Кондратьев К. Я., Шерман С. Г. Устойчивость биосферы и сохранение цивилизации // Природа. 1990. № 7. С. 3–16.
16. Золотарев В. А., Сдасюк Г. В. Земля в опасности. М.: Знание, 1989. 44 с.
17. Изразль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеоздат, 1984. 560 с.
18. Кадацкий Б. В. Климат как продукт биосферы. Минск: Наука и техника, 1986. 112 с.
19. Климатические и биологические последствия ядерной войны / Отв. ред. Е. П. Велихов. М.: Наука, 1987. 288 с.
20. Кондратьев К. Я. Всемирная климатическая исследовательская программа: состояние, перспективы и роль космических средств наблюдений // Итоги науки и техники. Метеорология и климатология. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 8. 274 с.

21. Кондратьев К. Я. Ключевые аспекты биосферных и экологических исследований (к итогам VII Генеральной ассамблеи СКОПЕ) // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1988. Т. 120, вып. 6. С. 481–489.
22. Кондратьев К. Я. Сравнительная метеорология планет // Итоги науки и техники. Астрономия. М.: ВИНТИ, 1988. Т. 37. 138 с.
23. Кондратьев К. Я. Энерго- и массообмен в биосфере // Вестн. АН СССР. 1988. № 11. С. 27–30.
24. Кондратьев К. Я. Ключевые проблемы глобальной экологии // Итоги науки и техники. Теоретические и общие вопросы географии. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 9. 454 с.
25. Кондратьев К. Я. Международный год космоса: приоритеты и перспективы // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 1. С. 3–13.
26. Кондратьев К. Я. Ключевые проблемы глобальной экологии и география // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1990. Т. 122, вып. 2. С. 113–120.
27. Кондратьев К. Я. Планета Марс. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 368 с.
28. Кондратьев К. Я. Глобальный климат. Л.: Наука, 1992. 361 с.
29. Кондратьев К. Я. Международная геосферно-биосферная программа (МГБП): состояние и перспективы // Изв. Всесоюз. геогр. об-ва. 1991. Т. 123, вып. 3. С. 2–7.
30. Кондратьев К. Я., Покровский О. М. Международная геосферно-биосферная программа. Ключевые аспекты требований к данным наблюдений Земли из космоса // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1989. № 1. С. 20–28.
31. Котляков В. М. Международная геосферно-биосферная программа „Глобальные изменения” // Вестн. АН СССР. 1988. № 1. С. 92–102.
32. К экологической безопасности: стратегия долговременного выживания. XVIII конгресс Социалистического интернационала. Стокгольм, 20–22 июля 1989 г. // Рабочий класс и современный мир. 1989. № 6. С. 111–122.
33. Лавров С. Б., Сдасюк Г. В. Этот контрастный мир: географические аспекты некоторых глобальных проблем. М.: Мысль, 1985. 207 с.
34. Лукашов К. И. Человек и природа. Минск: Наука и техника, 1984. 295 с.
35. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В. Радиационный баланс Земли: ключевые аспекты. М.: Наука, 1988. 224 с.
36. Мелуа А. И. Космические природоохранные исследования. Л.: Наука, 1988. 176 с.
37. Моисеев Н. Н., Александров В. В., Тарко А. М. Человек и биосфера. Опыт системного анализа и эксперименты с моделями. М.: Наука, 1985. 272 с.
38. Олейников Ю. В. Экологические альтернативы НТР. М.: Наука, 1987. 161 с.
39. Основные научные направления и темы „Программы биосферных и экологических исследований АН СССР на период до 2015 года”. М.: АН СССР, Комиссия по проблемам экологии, 1989. 74 с.
40. Петросян Л. А., Захаров В. В. Введение в математическую экологию. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 222 с.
41. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника и С. В. Викторова. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 200 с.
42. Розанов Б. Г. Основы учения об окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1984. 376 с.
43. Сердюк В. К., Толяренко Н. В. Орбитальные космические станции // Итоги науки и техники. Ракетостроение и космическая техника. М.: ВИНТИ, 1989. Т. 10. 192 с.
44. Сердюков В. М. Аэрокосмические методы географических исследований. Киев: Вища школа, 1987. 223 с.

45. Сидякин В. Г., Темурьянц Н. А., Макеев В. Б., Владимирский Б. М. Космическая экология. Киев: Наукова думка, 1985. 176 с.
46. Сытник К. М., Брайон А. Б., Гордецкий А. В. Биосфера. Экология. Охрана природы: Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1987. 523 с.
47. Фокин А. Д. Почва, биосфера и жизнь на Земле. М.: Наука, 1986. 177 с.
48. Фортескью Д. Геохимия окружающей среды. М.: Прогресс, 1985. 360 с.
49. Хозин Г. С. Глобальные проблемы современности. Критика буржуазных концепций. М.: Мысль, 1982. 280 с.
50. Яблоков А. В., Остроумов С. А. Уровень охраны живой природы. М.: Наука, 1985. 176 с.
51. Abbott M. R. Biological oceanography // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 11-13.
52. Ackley S. F. Sea ice // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 41-43.
53. A strategy for earth science from space in the 1980's and 1990's. Pt II. Atmosphere and interactions with the solid earth, ocean and biota. Washington, D. C.: Nat. Acad. Press, 1985. 199 p.
54. Bengtsson L., Shukla J. Integration of space and in situ observations to study global climate change // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1988. Vol. 69, N 10. P. 1130-1143.
55. BEST. Tropical system energy budget (Bilan énergétique de système tropical). Toulouse: CNES, 1988. 58 p.
56. Bolle H.-J., Rasool S. I. (ed.). Development of the implementation plan for the International satellite land-surface climatology project (ISLSCP). Phase I // World Climate Pap. WMO/TD-N46. 1985. N 94. 83 p.
57. Browning K. A. Prospects for determining global precipitation from space observations in the years 1995-2000 // World Climate Pap. 1987. N 137. Appendix I. 8 p.
58. Bruntland G. H. Global change and our common future // Environment. 1989. Vol. 31, N 5. P. 16-20, 40-44.
59. Changing the global environment // Ed. by D. B. Botkin, M. F. Caswell, J. E. Estes. New York e. a.: Acad. Press, 1989. 480 p.
60. Clark W. C., Munn R. E. (ed.). Sustainable development of the biosphere. Cambridge: Univ. Press, 1986. 491 p.
61. Climate change. The IPCC scientific assessment // Cambridge: Univ. Press, 1990. 365 p.
62. Concept of the global energy and water cycle experiment. Report of the JSC study group on GEWEX. WCRP-5 (WMO/TD-N 215). Geneva, 1988. 70 p.
63. Delwiche C. C. Biogeochemical considerations // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 8-10.
64. Dutton J. A. The EOS data and information system: concepts for design // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1989. Vol. 27, N 2. P. 109-116.
65. Earth system science. A closer view. Report of the Earth system sciences committee. Washington, D. C.: NASA, 1988. 208 p.
66. Elkington J., Shapley J. The shrinking planet. U. S. Information technology and sustainable development // World Resources Inst. Pap. 1988. N 3. 78 p.
67. Ellis D. Environments at risk. Case histories of impact assessment. Washington, D. C., 1989. 350 p.
68. Global energy and water cycle experiment (GEWEX). Report of the JSC scientific steering group for GEWEX. WCRP-25 (WMO/TD-N 321). Geneva, 1989. 27 p.
69. Global ecology / Ed. by M. B. Rambler, L. Margulis, R. Fester. New York: Acad. Press, 1989. 210 p.
70. Gorshkov V. G., Kondratyev K. Ya., Sherman S. G. The global carbon cycle change: Le Chatelier principle in the response of biota to changing CO₂ concentration in the atmosphere // Il Nuovo Cimento. 1990. Vol. 13C, ser. 1, N 5. P. 801-816.

71. Jorgensen S. E. Fundamentals of ecological modelling. Amsterdam: Elsevier, 1988. 391 p.
72. Kanemasu E. T. Land biology // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 21-23.
73. Kirchner J. W. The GAIA hypothesis: can it be tested? // Rev. Geophys. 1989. Vol. 27, N 2. P. 223-235.
74. Kondratyev K. Ya. Key problems of environmental studies: International Geosphere-Biosphere Program // Ztschr. Meteorol. 1985. Bd 35, N 6. S. 309-313.
75. Kondratyev K. Ya. The International Geosphere-Biosphere Program: the role and place of sun-atmosphere interrelationships // Geofis. Int. 1989. Vol. 28, N 3. P. 453-466.
76. Kondratyev K. Ya. The international space year: priorities and perspectives // Il Nuovo Cimento. 1990. Vol. 13C, ser. 1, N 5. P. 835-846.
77. Kondratyev K. Ya., Adamenko V. N., Henderson-Sellers B. e. a. Using large lakes as analogues for oceanographic studies // Modeling marine ecosystems / Ed. by A. M. Davies. Boca Raton: CRC Press, 1990. Vol. 2. P. 299-344.
78. Kotlyakov V. M., Mather J. R., Sdasyuk G. V., White G. F. Global change: geographical approaches (a review) // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1988. Vol. 85. P. 5986-5991.
79. Lange C. B., Burke S. K., Berger W. H. Biological production of southern California is linked to climatic change // Climatic Change. 1990. Vol. 16, N 3. P. 319-330.
80. Leovy C. B. Tropospheric science // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 44-48.
81. Likens G. E. Long-term studies in ecology: Approaches and alternatives. New York e. a.: Springer Verlag, 1989. 214 p.
82. Link L. E. Computability of present hydrologic models with remotely sensed data // Proc. 17th Intern. symp. remote sens. environ. 1984. Vol. 1. P. 133-153.
83. Lovelock J. E. Geophysiology, the science of Gaia // Rev. Geophys. 1989. Vol. 27, N 2. P. 215-222.
84. Malone T. F. Mission to planet Earth. Integrating studies of global change // Environment. 1986. Vol. 28, N 8. P. 6-11, 39-42.
85. McElroy M. B., Schneider S. R. The space station polar platform: integrating research and operational missions // NOAA Techn. Rep. NESDIS-19. Washington, D. C., 1985. 19 p.
86. Melack J. M. Inland aquatic resources and biogeochemical cycles // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 15-17.
87. Mohnen V. Tropospheric chemistry // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 24-27.
88. Moore B., III. Global biogeochemistry: an overview // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 5-7.
89. Munn R. E. Towards sustainable development: an environmental perspective // Preprint for the Intern. Conf.: Environment and Development. Milano, 1988. 22 p.
90. Rasool S. I. (ed.). Potential of remote sensing for the study of global change // Adv. Space Res. 1987. Vol. 7, N 1. 97 p.
91. Raven P. H. The global ecosystem in crisis. Chicago, IL: A MacArthur Foundation Occasional Paper, 1987. 24 p.
92. Robin G. de Q. Polar glaciology // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 37-40.
93. Roederer J. G. The proposed International Geosphere-Biosphere Program: some special requirements for disciplinary coverage and program design // Global change: Proc. Symp. ICSU. Paris: ICSU Press, 1984. P. 1-20.
94. Scientific plan for the global energy and water cycle experiment. WCRP-40 (WMO/TD-N376). Geneva, 1990. 83 p.

95. Space-based remote sensing of the earth. A report to the congress NOAA and NASA. Washington: U. S. Government Printing Office, 1987. 123 p.
96. Space opportunities for tropospheric chemistry research // Proc. workshop held in New York, N. Y.: NASA Conf. Publ. 1987. N 2450. 86 p.
97. Survey of environmental related monitoring programmes of international organizations // Economic Summit. Neuerberg, FRG. 1986. 38 p.
98. Taylor F. W. Infrared remote sensing of the middle atmosphere from satellites: the stratospheric and mesospheric sounder experiment 1978-1983 // Surv. Geophys. 1987. Vol. 9, N 2. P. 123-148.
99. The atmospheric sciences: A vision for 1989-1994. Report of the NSF-UCAR long-range planning committee. Washington, D. C.: Nat. Acad. Press, 1987. 48 p.
100. The International Geosphere-Biosphere Program: A study of global change final report of the Ad Hoc Planning Group // Global Change Rep. 1986. N 1. 21 p.
101. The International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) Programme. A core project of the International Geosphere-Biosphere Programme. Paris: IAMAP, 1989. 55 p.
102. The Noordwijk declaration on climate change. Atmospheric pollution and climatic change. Ministerial conference held at Noordwijk, the Netherlands. 1989. 12 p.
103. Tomlinson R., Mounsey H. (ed.). Building data bases for global science. London: Taylor and Francis, 1988. 419 p.
104. Treshnikov A. F., Kondratyev K. Ya. Interaction between biosphere and geosphere as the key aspect of the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) // Environ. Pollution Monitor. and Res. Progr. N 45. Techn. Doc. WMO/TD-N151. 1986. P. 63-80.
105. UARS. Upper atmosphere research satellite. Washington, D. C.: NASA, 1989. 28 p.
106. UNEP. The state of the world environment. Nairobi: UNEP, 1987. 76 p.
107. Usher P. Special report. World conference on the changing atmosphere: Implications for global security // Environment. 1989. Vol. 31, N 1. P. 24-38.
108. Walter H. Vegetation of the earth and ecological systems of the geobiosphere. New York e. a.: Springer Verlag, 1985. 318 p.
109. WCED. Our common future. Oxford, UK: Univ. Press, 1987. 383 p.
110. White R. M. Greenhouse policy and climate uncertainty // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1989. Vol. 70, N 9. P. 1123-1127.
111. Wilson S., Dozier J. NASA selects payload for first EOS satellite // The Earth Observer. 1991. Vol. 3, N 1. P. 1-5.
112. Zinke P. Forest environments // NASA Techn. Memo. 86129. Greenbelt, MD: GSFC, 1984. Vol. 1, pt 2. P. 18-20.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение.....	3
1.1. Ключевые направления биосферных и экологических исследований.....	3
1.2. Пределы устойчивости биосферы.....	9
1.3. Социально-экономические аспекты устойчивого развития.....	11
2. Международная геосферно-биосферная программа (МГБП): глобальные изменения.....	14
2.1. Приоритеты МГБП.....	14
2.2. Оптимизация глобальной системы наблюдений.....	22
2.2.1. Выбор спектральных интервалов.....	25
2.2.2. Оптимизация условий проведения космической съемки.....	26
2.3. Устойчивость биосферы как основа экологической безопасности ..	27
2.3.1. Вводные замечания.....	27
2.3.2. Биологическая регуляция окружающей среды.....	28
2.3.3. Механизмы биологической регуляции окружающей среды ..	30
2.3.4. Функционирование принципа Ле Шателье в биосфере.....	32
2.3.5. Нарушение принципа Ле Шателье в современной биосфере ..	34
2.3.6. Биосфера как „свободный рынок“.....	37
2.3.7. Сообщества биосферы.....	39
2.3.8. Эволюция.....	42
2.3.9. Проблема прогресса.....	43
2.3.10. Сохранение биосферы.....	45
2.3.11. Переход к ноосфере?.....	48
2.3.12. Заключение.....	50
3. Глобальный экологический мониторинг: роль спутниковых наблюдений.....	52
3.1. Ключевые направления разработок глобальной системы экологического мониторинга.....	52
3.2. Система наблюдений Земли.....	68
3.3. Международный год космоса.....	72
3.3.1. Приоритетные исследования.....	74
3.3.2. Подготовка к осуществлению программы МГК.....	82
Литература.....	87

Научное издание

Кирилл Яковлевич Кондратьев

ГЛОБАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ
И ТРЕБОВАНИЯ К ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ

Утверждено к печати
Институтом озероведения
РАН

Редактор издательства *А. Л. Иванова*
Художник *А. Т. Пожевинов*
Технический редактор *В. В. Шиханова*
Корректор *А. В. Келле-Пелле*

ИБ № 44970

Набор выполнен в издательстве на наборно-печатающем автомате. Подписано к печати 12.03.92. Формат 60 x 90 1/16. Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6.00. Усл. кр.-от. 6.25. Уч.-изд. л. 6.59. Тираж 535. Тип. зак. № 1811. С 218.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство „Наука”.
С.-Петербургское отделение.
199034, Санкт-Петербург, В-34, Менделеевская лин., 1.

Ордена Трудового Красного Знамени Первая типография
издательства „Наука”.
199034, Санкт-Петербург, В-34, 9 лин., 12.

**КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА „НАУКА” МОЖНО ПРЕДВАРИТЕЛЬНО
ЗАКАЗАТЬ В МАГАЗИНАХ КОНТОРЫ „АКАДЕМКНИГА”,
В МЕСТНЫХ МАГАЗИНАХ КНИГОТОРГОВ ИЛИ
ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ КООПЕРАЦИИ.**

Для получения почтой заказы просим направлять по адресу:

- 117393 Москва, ул. Академика Пилюгина, 14, корп. 2, Магазин „Книга – точтой” Центральной конторы „Академкнига”;
- 252107 Киев, Татарская ул., 6, магазин „Книга – почтой”;
- 197345 С.-Петербург, Петрозаводская ул., 7, магазин „Книга – почтой” Северо-Западной конторы „Академкнига”
или в ближайший магазин „Академкнига”, имеющий отдел „Книга – почтой”;
- 480091 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 („Книга – почтой”);
- 370091 Баку, Коммунистическая ул., 51 („Книга – почтой”);
- 232600 Вильнюс, ул. Университето, 4;
- 690088 Владивосток, Океанский пр., 140 („Книга – почтой”);
- 320093 Днепропетровск, пр. Гагарина, 24 („Книга – почтой”);
- 734001 Душанбе, пр. Ленина, 95 („Книга – почтой”);
- 375002 Ереван, ул. Туманяна, 31;
- 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289 („Книга – почтой”);
- 420043 Казань, ул. Достоевского, 53 („Книга – почтой”);
- 252030 Киев, ул. Ленина, 42;
- 252142 Киев, пр. Вернадского, 79;
- 252025 Киев, ул. Осипенко, 17;
- 277012 Кишинеу, пр. Ленина, 148 („Книга – почтой”);
- 343900 Краматорск, Донецкой обл., ул. Марата, 1 („Книга – почтой”);
- 660049 Красноярск, пр. Мира, 84;
- 443002 Самара, пр. Ленина, 2 („Книга – почтой”);
- 191104 С.-Петербург, Литейный пр., 57;
- 199034 С.-Петербург, Таможенный пер., 2;
- 194064 С.-Петербург, Тихорецкий пр., 4;
- 220012 Минск, Ленинский пр. 72 („Книга – почтой”);
- 103009 Москва, ул. Горького, 19а;

- 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7;
- 630076 Новосибирск, Красный пр., 51;
- 630090 Новосибирск, Морской пр., 22 („Книга – почтой”);
- 142284 Противино, Московской обл., ул. Победы, 8;
- 142292 Пущино, Московской обл., МР „В”, 1 („Книга – почтой”);
- 620151 Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 137 („Книга – почтой”);
- 700000 Ташкент, ул. Ю. Фучика, 1;
- 700029 Ташкент, ул. Ленина, 73;
- 700070 Ташкент, ул. Шота Руставели, 43;
- 700185 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6 („Книга – почтой”);
- 634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18;
- 450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10 („Книга – почтой”);
- 450025 Уфа, ул. Коммунистическая, 49;
- 720001 Бишкек, бульв. Дзержинского, 42 („Книга – почтой,,).
- 310078 Харьков, ул. Чернышевского, 87 („Книга – почтой”).