

Академик РАН А.И. Савин, В.Г. Бондур

Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем

ЦНИИ «Комета», г. Москва

Поступила в редакцию 27.12.99 г.

Систематизированы основные научные и технические проблемы, решенные на протяжении более чем 50-летней истории создания и эксплуатации глобальных аэрокосмических систем различного назначения.

1. Введение

На протяжении многих лет коллективами организаций промышленности, институтов Академии наук и других ведомств нашей страны созданы сложные глобальные информационные и информационно-управляющие аэрокосмические системы. К таким системам в первую очередь можно отнести: глобальные космические системы наблюдения за динамическими объектами в атмосфере Земли; космические системы морского контроля; космические системы обеспечения экологической безопасности в космосе; аэрокосмические системы для детальных исследований атмосферы, океана, суши и околоземного космического пространства; системы контроля химической и радиационной обстановок и многие другие.

В процессе разработки, изготовления и эксплуатации этих систем возникала необходимость решения многих сложных научных и технических проблем. Эта необходимость обусловлена необычностью технологии создания глобальных аэрокосмических систем, которая требует предварительного проведения широкомасштабных экспериментальных и теоретических исследований, накопления больших объемов информации о наблюдаемых объектах и явлениях как в региональном, так и планетарном масштабах, позволяющих сформировать адекватные исходные данные для проектирования систем в целом, их отдельных подсистем и компонентов [1–9, 12–15].

В решение многих из этих проблем существенный вклад внес коллектив Института оптики атмосферы Сибирского отделения РАН (ранее АН СССР), созданный и в течение многих лет возглавляемый академиком В.Е. Зуевым. Учеными этого института выполнены фундаментальные работы по исследованию и созданию моделей распространения оптического (в том числе лазерного) излучения в атмосфере, созданию статистических моделей облачных полей, климатическому районированию земного шара, разработке методов дистанционного зондирования атмосферы и океана, а также по ряду других важнейших направлений [10, 11, 28–31, 112–114, 124–128]. Результаты этих фундаментальных работ использованы и продолжают использоваться при разработке и эксплуатации глобальных и региональных аэрокосмических систем.

В процессе создания этих систем накоплен мощный научный и технический потенциал, разработаны высокие

наукоемкие технологии, диверсификация которых позволяет решать сложные проблемы в следующих областях: мониторинг окружающей среды в экологических и природоохранных целях; контроль чрезвычайных ситуаций, вызванных техногенными авариями и природными катастрофами; разработка методов и создание аппаратуры дистанционного зондирования, современных космических систем связи, методов, аппаратных и программных средств обработки больших потоков информации; разработка методов математического, физического и имитационного моделирования; проведение фундаментальных исследований океана, атмосферы, суши и околоземного космического пространства и многих других.

2. Научные проблемы, решенные в процессе создания глобальных аэрокосмических систем

При создании глобальных аэрокосмических систем проводились широкомасштабные многопрофильные теоретические и экспериментальные исследования, в результате которых решен ряд следующих чрезвычайно сложных научных проблем.

1. Разработаны на основании теории создания сложных систем общесистемные принципы построения аэрокосмических систем различного назначения [1–8]:

– делимость всей системы на конечное число частей – подсистем, каждая из которых состоит из отдельных элементов (группировок летательных аппаратов (ЛА), аппаратуры дистанционного зондирования, средств управления, бортовых и наземных средств обработки информации, средств связи и обмена данными и т.п.);

– отдельные подсистемы функционируют не автономно, а во взаимосвязи и управляются центральным звеном;

– объединение отдельных подсистем осуществляется системой связи, обеспечивающей передачу команд управления и доставку информации потребителям различных уровней;

– соблюдение принципов открытых систем (функциональная расширяемость, модернизируемость, интегрируемость информационных ресурсов, простота перехода эксплуатирующего персонала от одних аппаратурно-программных средств к другим в процессе эволюционного развития систем и т.д.).

2. Разработаны новые технологии создания сложных аэрокосмических систем, их отдельных компонентов, устройств, элементов, основанных на использовании методов математического и имитационного моделирования; моделей фоновых-целевых обстановок и баз данных о характеристиках различных объектов окружающей среды, бортовых технологий и высокоинтегрированной элементной базы, позволяющей снизить объем дорогостоящих стендовых и натурных испытаний, миниатюризации громоздких наземных комплексов и снижения затрат на создание, испытания и эксплуатацию систем [1–3].

3. Разработаны методологии моделирования полей сигналов на входе аэрокосмических систем, основанные на информационном подходе и развитых статистических, структурных и нечетко множественных методах, которые обеспечивают адекватное описание и синтез стохастических полей электромагнитного излучения, регистрируемых различными типами аппаратуры дистанционного зондирования, а также систематическое накопление исходных данных о наблюдаемых объектах и фонах [12–21]. С использованием этой методологии созданы модели спектрноэнергетических и пространственно-частотных характеристик различных объектов и фонов, модели распространения электромагнитного излучения в атмосфере и океане, целый спектр гидродинамических и электродинамических моделей, географо-климатические, метеорологические и другие модели [1, 6, 12–32], а также накоплены базы данных о характеристиках различных процессов и явлений, наблюдаемых аэрокосмическими системами [14, 15, 20, 21].

Разработанная методология и созданные модели позволили научно обосновать направление экспериментальных и теоретических исследований для получения исходных данных, необходимых для разработки физических основ, принципов и технических путей построения глобальных и региональных аэрокосмических систем, а также обеспечить их испытания и эксплуатацию [1–8, 12–18].

4. Разработаны методы и компьютерные технологии синтеза стохастических полей излучения, основанные на предложенном методе «фазового спектра» и позволяющие адекватно моделировать в различных спектральных диапазонах изображения пространственно однородных и пространственно неоднородных объектов на поверхности океана, суши и в атмосфере, с использованием двумерных пространственных спектральных моделей, гипотез о распределении фаз, а также другой априорной информации [14, 15, 19]. Эти методы и технологии успешно применяются при имитационном моделировании в процессе разработки и испытаний эксплуатации аэрокосмических систем [1, 4–8, 12–15], а также могут быть широко использованы во многих других областях [1, 2, 13–15, 17, 33–38].

5. Разработаны не имеющие аналогов методы проведения комплексных натурных экспериментов с использованием космических, воздушных, наземных, водных и других средств, обеспечивающих получение достоверных статистически обоснованных данных о наблюдаемых объектах, процессах и явлениях [1, 14, 15, 18]. В результате проведенных уникальных исследований накоплены проблемно ориентированные базы данных о характеристиках различных объектов и фонов в океане, атмосфере, на суше и в околоземном космическом пространстве. Общий объем базы составляет $\sim 10^8$ Тбайт [1, 6, 14, 15, 20, 21]. Использование накопленной в этих экспериментах информации обеспечивает возможность обосновать принципы построения систем в целом, их отдельных элементов и аппаратурных комплексов, создать

новые и усовершенствовать существующие модели объектов и фонов, методы обработки информации, реализованные в наземных и бортовых комплексах, осуществить постановку широкомасштабных вычислительных экспериментов по отработке и испытаниям аэрокосмических систем.

6. Установлены и подтверждены многочисленными натурными и лабораторными экспериментами, а также детально исследованы неизвестные ранее процессы, явления и эффекты, связанные с взаимодействием гидрофизических полей толщи океана с его поверхностью, в том числе [14, 15, 17, 18, 22–25, 39, 41–43, 50, 51, 72–85]:

- выявлены устойчивые к изменению гидрометеорологические условия, структурные образования на поверхности морей и океанов, в области взаимодействия с глубинными гидродинамическими процессами, выделяемые по изменениям пространственно-частотных спектров волнения, и определены их формы, топологические и динамические свойства, обеспечивающие возможность их надежной индикации с аэрокосмических носителей [13–15, 39–42];

- установлены и подтверждены многочисленными экспериментами неизвестные ранее эффекты, связанные с подавлением высокочастотных спектральных составляющих и генерацией дополнительных спектральных компонент, изменением ориентации двумерных пространственных спектров в областях взаимодействия с поверхностным волнением цугов внутренних волн, полей течений, турбулентности, конвективных движений, циркуляционных движений и вихревых структур различных масштабов и т.п., позволяющих исследовать эти глубинные явления по их проявлениям на поверхности морей и океанов [3, 6, 7, 13–18, 39–41, 50, 51, 72–75];

- сформированы поля пенной активности и изменены под действием различных гидродинамических процессов в приповерхностном слое океана [60, 61].

7. Выявлен в результате проведения широкомасштабных комплексных экспериментальных и теоретических исследований ряд неизвестных ранее закономерностей в таких областях, как [14, 15, 18, 27–31, 45, 47, 53–59, 62–71, 124–128]:

- формирование полей электромагнитного излучения в оптическом и радиодиапазонах спектра, отражаемых, излучаемых и рассеиваемых различными объектами и фонами;

- взаимодействие гидрофизических полей толщи океана с его поверхностью;

- газодинамические и термодинамические явления, сопровождающие формирование газопылевых образований, обусловленных извержениями вулканов, различными пожарами и т.п.;

- взаимодействие лазерного излучения с различными веществами;

- формирование облачных полей в атмосфере Земли;

- свечение верхней атмосферы;

- солнечно-земные связи;

- распространение электромагнитных волн в различных средах;

- взаимодействие радиоволн с ионосферой и многими другими областями.

8. Разработаны и практически реализованы новые методы дистанционного зондирования океана, атмосферы, суши и околоземного космического пространства, в том числе:

- методы дистанционной пространственно-частотной спектроскопии [7, 14–18, 25, 39, 40], обеспечивающие формирование двумерных и одномерных пространствен-

ных спектров различных объектов на поверхности океана, на суше и в атмосфере, выделение и классификацию областей с аномальными характеристиками и определение значимых параметров среды по информативным признакам спектров, а также снабжение исходными данными технологии синтеза стохастических полей яркости с использованием метода фазового спектра;

– методы радиоволнографии и радиотомографии поверхностного волнения и подповерхностных явлений, связанные с изменением границ течений, внутренними волнами, характеристиками стратификации, обеспечивающие возможность по данным аэрокосмического радиолокационного зондирования океана формировать компьютерные образы поверхностных и подповерхностных явлений путем решения системы уравнений, описывающих взаимодействие радиосигналов с пространственным спектром поверхностного волнения и полями подповерхностных течений [1, 3, 7, 17, 41–43];

– методы ИК- и СВЧ-радиометрии [16, 41–44];

– многоспектральные методы видимого и ИК-диапазонов [1, 15, 16];

– Фурье-спектрометрии [18, 46];

– лазерного зондирования атмосферы и океана [27–29, 38, 45];

– многочастотного радиопросвечивания ионосферы и др. [47, 48].

Разработанные методы с успехом применяются для наблюдения за различными объектами и могут эффективно использоваться для мониторинга окружающей среды, контроля воздействия естественных и антропогенных факторов на различные экосистемы, исследования природных ресурсов Земли, контроля чрезвычайных ситуаций, глобального мониторинга состояния озоносферы, мониторинга тепловых источников, таких как лесные и другие пожары, извержения вулканов, определения рельефа морского дна на больших площадях, краткосрочного прогноза катастрофических землетрясений, мониторинга геологической обстановки, обеспечения экологической безопасности в околоземном космическом пространстве, решения задач в интересах метеорологии, геодезии и картографии, сельского хозяйства, городского планирования, решения фундаментальных наук о Земле и во многих других областях [5–8, 14–18, 23, 24, 38–49].

9. Разработаны новые методы, алгоритмы и программы обработки больших потоков информации, формируемых различными типами аппаратуры дистанционного зондирования [14, 15, 19, 36, 39, 41, 86–91]:

– для выделения и классификации слабоконтрастных пространственно протяженных и малоразмерных объектов на фоне стохастических помех, с использованием параметрических и непараметрических подходов, а также процедур адаптивной кластеризации и др.;

– расчета энергетических, пространственных и динамических параметров полей сигналов от объектов дистанционного зондирования;

– обработки изображений с высокой информационной емкостью с целью получения и статистического анализа многомерных массивов информативных признаков, необходимых для классификации изображений по различным критериям и определения значимых параметров наблюдаемых объектов и явлений;

– бортовой интеллектуальной обработки изображений, реализующих процедуры выделения кластеров в пространстве признаков;

– синтеза реализаций двумерных и трехмерных стохастических полей яркости, регистрируемых различными типами аппаратуры дистанционного зондирования;

– поддержки и обслуживания банков данных, предназначенных для хранения больших объемов информации, полученной при исследовании различных объектов дистанционного зондирования;

– обеспечения работы экспертных систем, позволяющих в реальном масштабе времени анализировать информацию, поступающую с различных датчиков, обнаруживать объекты и явления в контролируемом пространстве, определять их типы и оценивать параметры, прогнозировать развитие наблюдаемых ситуаций и вырабатывать рекомендации по оптимальному управлению исполнительными средствами и средствами контроля.

10. Разработаны методы, алгоритмы и программы управления космическими аппаратами (КА), в том числе для регистрации и обработки телеметрической информации, а также управления с одного командного пункта группировками КА на различных орбитах.

11. Разработаны новая архитектура и принципы построения технических средств обработки больших потоков информации, в том числе [1–6, 14, 15, 18, 24, 38–41, 80, 86, 92]:

– наземных систем обработки последовательностей цифровых изображений с высокой информационной емкостью для выделения малоразмерных динамических объектов на фоне случайных помех в масштабе времени, близком к реальному;

– наземных оптических, оптико-цифровых и цифровых систем обработки больших потоков изображений с высокой информационной емкостью (до 10^9 бит/кадр) для получения значимых параметров объектов и фонов;

– бортовых специальных вычислителей для предварительной обработки больших объемов данных, обеспечивающих фильтрацию информации и снижение потоков данных, передаваемых по радиолиниям на наземные пункты;

– бортовых оптико-цифровых и цифровых комплексов обработки изображений для пространственного спектрального анализа, выделения и распознавания различных аномалий поверхности океана и суши, в том числе в масштабе времени, близком к реальному.

12. Разработаны принципы построения космических систем связи с остронаправленными многолучевыми, разворачиваемыми в космосе антеннами большого диаметра, позволяющих осуществлять различные виды связи (персональную, подвижную, фиксированную) и многократно использовать выделенные частоты, обеспечивать экологическую безопасность абонентов за счет низкой излучаемой мощности терминала ($\sim 0,03$ Вт), сопряжение со всеми видами существующих систем связи общего пользования при низкой стоимости и низких тарифах [1, 9, 95–100].

13. Разработаны физические основы и созданы высокоэффективные бортовые источники энергоснабжения, обеспечивающие возможность работы активных и пассивных средств дистанционного зондирования на борту КА [1, 93, 94].

Результаты проведенных исследований выполненными разработками многократно обсуждались и получили одобрение на научных советах при Президиуме Российской академии наук (ранее Академии наук СССР) по проблемам гидрофизики и обработки изображений, по космосу и др., а также на многих межведомственных и отраслевых советах.

3. Технические проблемы, решенные при создании глобальных аэрокосмических систем

В процессе разработки, испытаний и эксплуатации созданных и создаваемых аэрокосмических систем решен целый комплекс сложнейших технических проблем, основными из которых являются [1, 4–7, 15, 41, 42, 47]:

1. Разработка и реализация оригинальных принципов орбитального построения для решения различных задач, таких как глобальный оперативный контроль динамических объектов в атмосфере, освещение обстановки в Мировом океане, обеспечение экологической безопасности в космосе и других [1–4, 49, 93, 94]. Одним из примеров реализации таких принципов является комбинация геостационарных и высокоэллиптических орбит для обеспечения беспрерывного глобального круглосуточного наблюдения различных явлений на земном шаре [1].

2. Реализация однопунктового метода управления космическими аппаратами, обеспечивающего существенное сокращение затрат на создание системы без снижения точности определения и коррекции траекторных параметров [1, 3, 93, 94] и создание наземных пунктов, обеспечивающих управление, группировку космических аппаратов на высокоэллиптических, геостационарных и других орбитах, прием и обработку данных, поступающих с их борта [1, 3, 9, 95].

3. Создание серии уникальных КА, обеспечивающих возможность размещения на их борту сложных комплексов аппаратуры дистанционного зондирования, бортовых вычислительных устройств, средств связи, бортового измерительного и исполнительного оборудования, систем энергообеспечения, ориентации и стабилизации и т.п., позволяющих реализовать разработанные общесистемные принципы построения различных глобальных аэрокосмических систем [1, 3, 93, 94].

4. Создание не имеющей аналогов системы ориентации и стабилизации геостационарных и высокоэллиптических КА, обеспечивающей высокоточное наведение узкополосной дистанционной аппаратуры на наблюдаемые траектории и объекты, позволяющей повысить точность определения координат наблюдаемых объектов [1–3].

5. Создание уникальной системы управления разгонными блоками и КА, размещаемой на КА, которая обеспечивает возможность оперативного перехвата аварийных космических объектов в широком диапазоне высот их полетов [3, 93].

6. Разработка технически реализуемого способа вывода космических аппаратов на геостационарные и высокоэллиптические орбиты с использованием лунного притяжения, обеспечивающего снижение требований к ракетам-носителям и дающего возможность увеличения полезной нагрузки на КА [3, 4, 93].

7. Создание многофункционального единого радиоканала Земля – космос и практическая реализация в штатных системах цифрового способа передачи информации, обеспечивающего не только решение функциональных задач, поставленных перед системами, но и внедрение найденных технических решений в создание выделенных и общедоступных систем космической связи [1–4, 93].

8. Создание уникальных комплексов аэрокосмической аппаратуры тепловизионного и телевизионного типов, в том числе многошкальной широкополосной инфракрасной аппаратуры, радиолокационных, радиопеленгационных и радиотепловых комплексов, аппаратуры дистанционной пространственно-частотной спектрометрии, спектромет-

ров, Фурье-спектрометров и др., обеспечивающих наблюдение за различными объектами на пределе физических возможностей [1–8, 16, 39–46].

9. Создание уникальных самолетных (ИЛ-76, АН-12, ТУ-134, АН-30) и вертолетных (МИ-26, МИ-6, МИ-8) летающих лабораторий, оборудованных широким набором аппаратуры дистанционного зондирования (фотографической, многозональной фотографической, телевизионной, тепловизионной, лидарной), пространственно-частотными спектрометрами, многоканальными СВЧ-радиометрами, РЛС бокового обзора, когерентными многочастотными радиолокаторами с синтезированием апертуры, Фурье-спектрометрами и т.п., обеспечивающей проведение экспериментальных исследований характеристик различных явлений в океане, атмосфере и на суше [7, 14, 15, 17, 44, 93].

10. Реализация в эксплуатируемых и создаваемых глобальных аэрокосмических системах различного назначения многоуровневого иерархического принципа сбора, обработки и распределения информации с использованием аналитических центров различных уровней космических и наземных каналов связи [1–9].

11. Реализация модульной технологии построения бортовых аппаратурных комплексов, основанной на их разделении на бортовое исполнительное, бортовое измерительное оборудование и общие интерфейсы, позволившей обеспечить реализацию способов унификации и типизации средств, а также возможность функциональной отработки и испытаний бортовых систем на наземных вычислительных комплексах с использованием процедур имитационного моделирования [1–4].

12. Разработка новой высокоэффективной технологии подготовки к запуску КА, обеспечивающей комплексную отладку бортовых и наземных средств с получением и оценкой конечных характеристик систем, позволяющей уменьшить количество стендовых образцов, снизить объемы натурных испытаний и затрат на создание системы [1–4].

Отмеченные выше научные и технические проблемы (перечень которых не является исчерпывающим), решенные в процессе создания, испытаний и эксплуатации сложных аэрокосмических систем, обеспечивают возможности использования достигнутых результатов и созданных аэрокосмических систем для различных сфер деятельности, что позволяет говорить о диверсификации разработанных технологий и систем. Ниже приведены основные направления такой диверсификации.

4. Создание систем мониторинга окружающей среды и контроля чрезвычайных ситуаций

Одним из наиболее важных направлений диверсификации аэрокосмических технологий и систем является организация мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях, а также контроля чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. Это обусловлено, с одной стороны, схожестью принципов построения созданных систем и тех, которые должны быть созданы для решения указанных задач, а с другой стороны, актуальностью этих задач, которая существенно возросла в последнее время [1–8, 14–17, 47–49, 101, 111, 115–122].

Ниже описаны принципы построения глобальных и региональных систем мониторинга окружающей среды, Межгосударственного центра экологического мониторин-

га, а также примеры использования разработанных технологий и созданных систем для мониторинга различных объектов окружающей природной среды: антропогенных воздействий на прибрежные акватории, тепловых источников, обусловленных извержениями вулканов и различными пожарами; для прогноза катастрофических землетрясений; мониторинга гелиогеофизической обстановки, аномалий озоносферы Земли, тропических циклонов; для обнаружения радиоактивных выбросов и ряда других применений.

4.1. Международная система глобального экологического мониторинга

Экологические проблемы по своей природе являются глобальными [103–118]. Поэтому в их решении определяющую роль играет международное сотрудничество, например, при разработке и осуществлении природоохранных мероприятий, особенно в организации экологического мониторинга, обеспечивающего независимой информацией об окружающей среде всех уровней – от локального до глобального. Актуальность решения проблем, связанных с созданием систем мониторинга окружающей среды, неоднократно обсуждалась на представительных международных форумах [110, 111, 120, 121].

Опыт, накопленный при создании и эксплуатации глобальных аэрокосмических систем, позволил выдвинуть концепцию построения Международной системы

глобального мониторинга окружающей среды. Эта концепция основана на многоуровневом иерархическом принципе использования обширного класса измерительной аппаратуры, установленной на космических аппаратах, функционирующих на различных орбитах, на воздушных, наземных и морских платформах, с широкой сетью пунктов приема и обработки данных, обеспечивающей получение информации о большинстве объектов окружающей среды в интересах как отдельных стран, так и планеты в целом [5–8, 16]. Система позволяет вести наблюдение в широком диапазоне пространственных масштабов с различным пространственным разрешением и различными периодами обновления информации. Принципы ее построения основаны на идее функциональной интеграции создаваемых национальных систем мониторинга, функционирующих ныне автономно, в объединенную международную глобальную информационно-управляющую систему с общими координирующими органами, с существующими и дополнительно создаваемыми информационно-аналитическими центрами различных уровней, с широкой сетью терминалов потребителей локального уровня, объединенных создаваемыми и существующими средствами связи. Для интеграции существующих средств в такую систему требуются ничтожные финансовые затраты по сравнению со средствами, использованными на создание национальных систем [5–8, 119, 120]. Обобщенная блок-схема такой системы приведена на рис. 1.

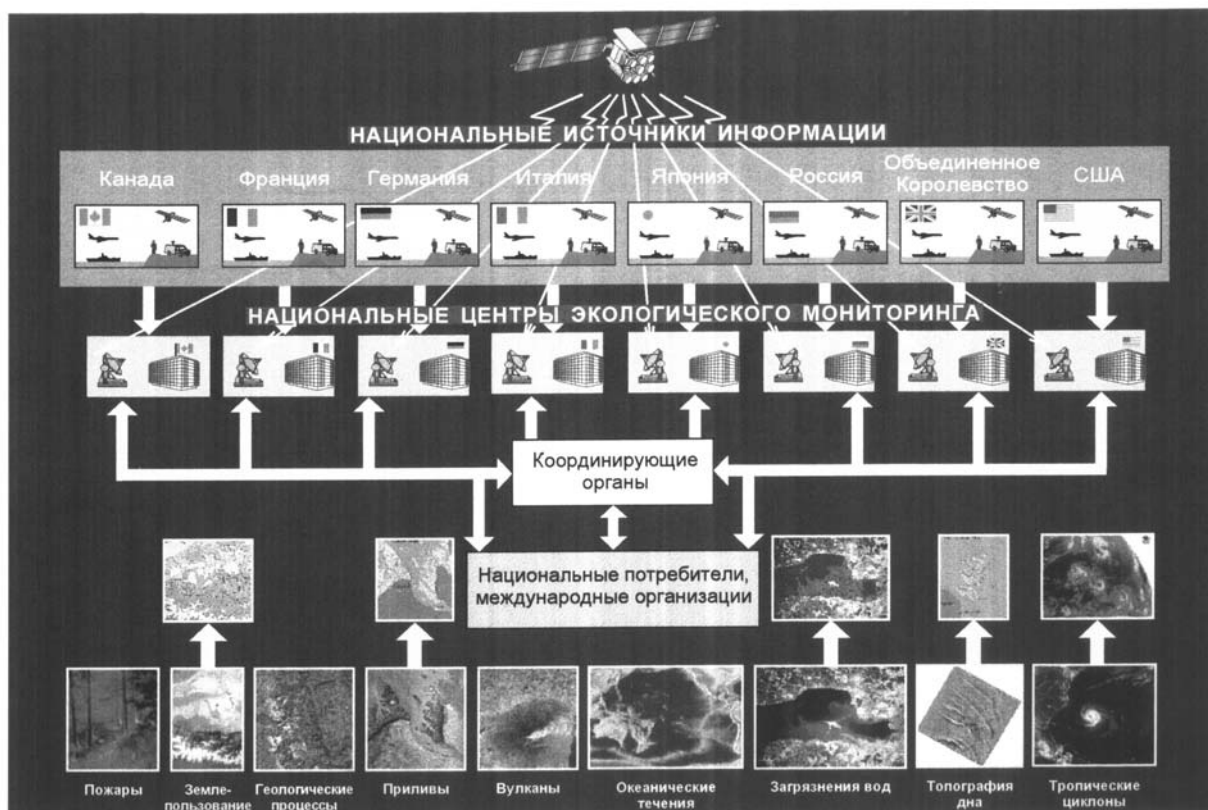


Рис. 1. Международная система глобального экологического мониторинга

Предлагаемая международная система глобального мониторинга может с успехом обеспечить получение необходимой экологической информации по основным про-

блемным вопросам как для каждой отдельно взятой страны, так и для всей планеты. Она позволит предоставить природоохранным органам государств, участвующих в ее

формировании и эксплуатации, мощное средство обоснования принимаемых эколого-экономических решений.

Для создания такой системы необходимо решение организационно-технических вопросов, связанных с обеспечением международного и межведомственного взаимодействия имеющихся систем и центров как на национальном, так и на межгосударственном уровнях при общей координации природоохранных ведомств участвующих стран.

Идея создания такой системы обсуждалась и поддержана на встрече руководителей государств – стран Восьмерки, в 1997 г. [119] на заседаниях Российско-Американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству [4, 8, 16, 20], на Общевропейском межправительственном совещании «Развитие системы экологического мониторинга в Европейском регионе» [120], а также на международных конференциях.

4.2. Межгосударственная система экологического мониторинга территории стран – участников СНГ

Для организации мониторинга окружающей среды на территории государств – участников СНГ создается Межгосударственная система экологического мониторинга (МГСЭМ). Она формируется на базе существующих национальных и региональных систем мониторинга государств в соответствии с межгосударственным Соглашением о сотрудничестве в области экологического мониторинга [122].

Основным назначением МГСЭМ является:

– обеспечение взаимодействия национальных, региональных и ведомственных служб и структур мониторинга;

– формирование общей системы сбора, обработки и передачи экологической информации на основе действующих и создаваемых коммуникационных систем и банков данных;

– разработка общего методического и программного обеспечения нормативно-методической базы сбора, обработки и передачи экологической информации;

– прогноз состояния окружающей природной среды с учетом трансграничных переносов вредных веществ, электромагнитных излучений и звуковых колебаний, распространения биологических объектов, источников экологической опасности, других природных аномалий;

– моделирование критических ситуаций и выявление источников экологической опасности;

– выявление аварий и катастроф природного и техногенного характера и своевременное предупреждение национальных и региональных органов управления об их масштабе, направлениях распространения и охватываемой территории;

– подготовка и предоставление административным органам управления и заинтересованным организациям рекомендаций для решения экологических проблем глобального и регионального характера, а также оперативного принятия мер, направленных на предупреждение населения и его защиту от последствий аварий и катастроф;

– проведение совместных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области экологического мониторинга.

Обобщенная принципиальная схема системы приведена на рис. 2.

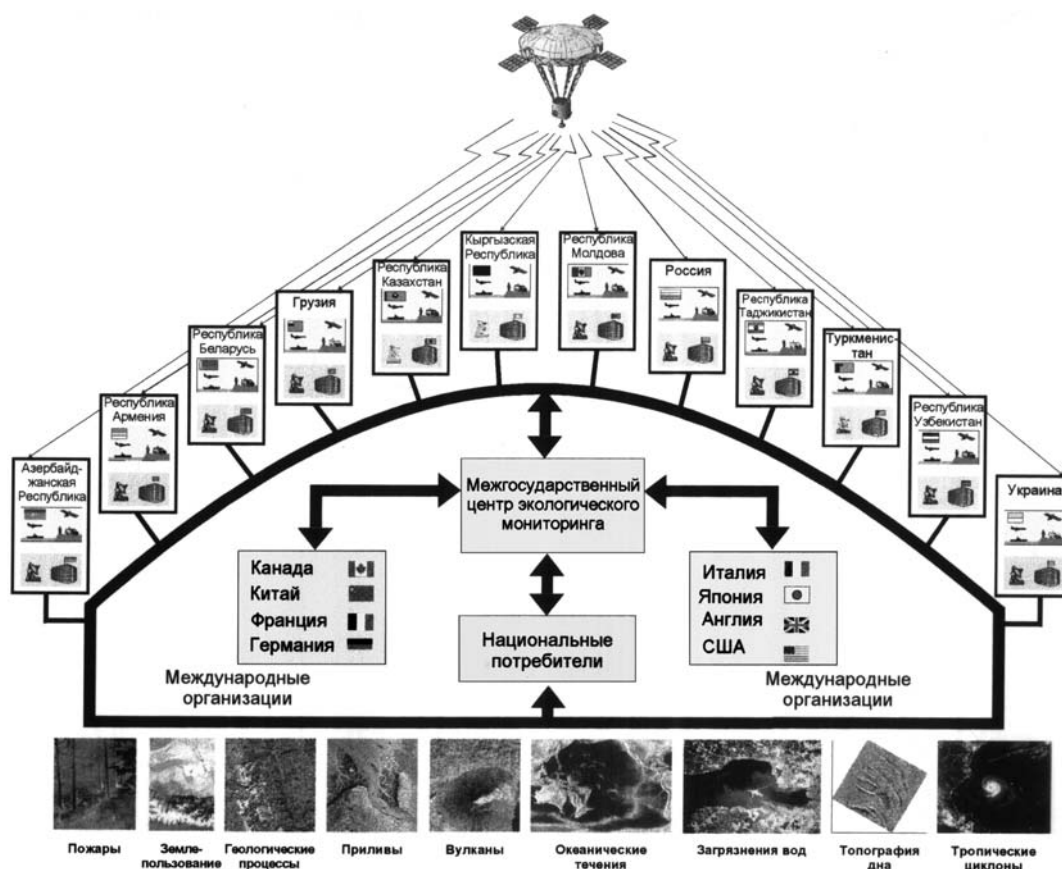


Рис. 2. Межгосударственная система экологического мониторинга

При создании МГЦЭМ целесообразно использовать опыт и технологии, накопленные при разработке и эксплуатации созданных глобальных аэрокосмических систем.

Концепция построения МГЦЭМ основана на функциональном объединении и поэтапном развитии существующих и создаваемых национальных и ведомственных систем в объединенную Межгосударственную информационно-управляющую систему с общим Международным центром экологического мониторинга, взаимодействующим с существующими и создаваемыми национальными информационно-аналитическими центрами различных уровней, широкой сетью терминалов потребителей локального уровня, объединенных создаваемы-

ми и существующими средствами связи. При этом предполагается максимальное использование средств диверсифицируемых глобальных информационно-управляющих систем.

4.3. Межгосударственный центр экологического мониторинга

Основным координирующим и системообразующим ядром является Межгосударственный центр экологического мониторинга (МГЦЭМ).

Схема функционирования Центра экологического мониторинга представлена на рис. 3.

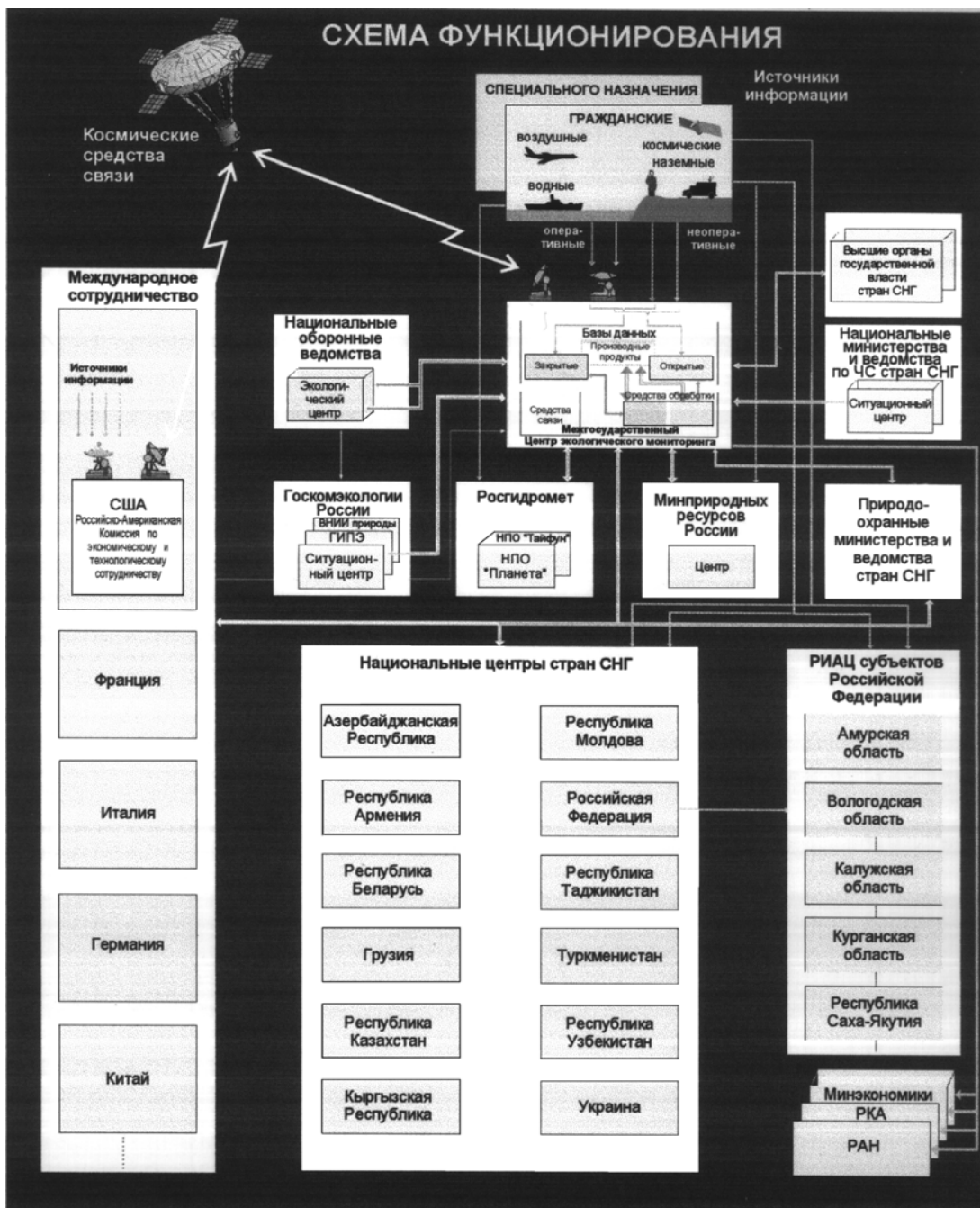


Рис. 3. Международный центр экологического мониторинга

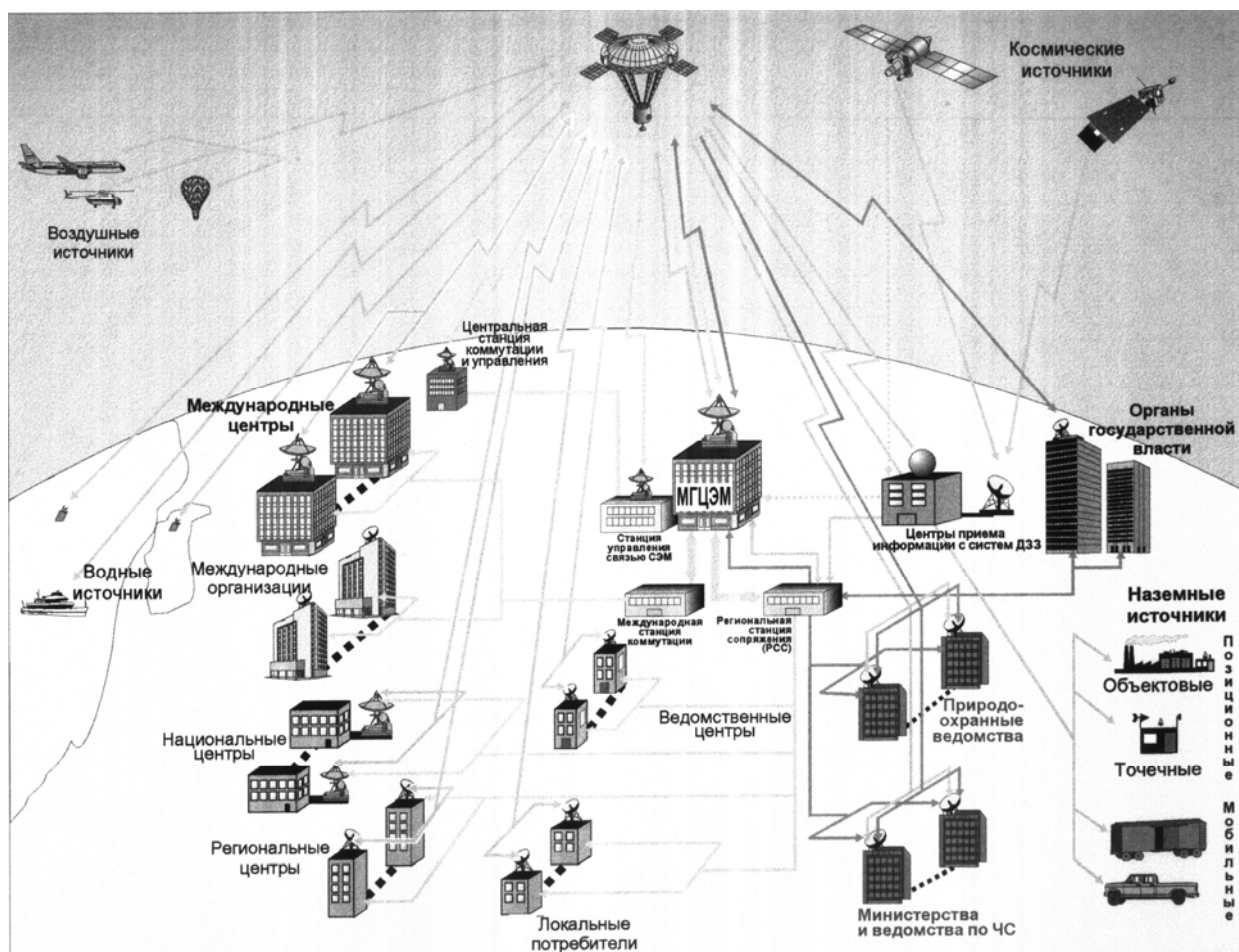


Рис. 4. Организация сбора и передачи данных в системах экологического мониторинга

При организации мониторинга территорий стран – участниц СНГ должно быть прежде всего организовано взаимодействие МГЦЭМ с существующими и создаваемыми национальными информационно-аналитическими центрами стран СНГ, а также региональными центрами этих стран, в том числе с региональными информационно-аналитическими центрами (РИАЦ) субъектов Российской Федерации.

Предусматривается также связь с информационно-аналитическими центрами природоохранных ведомств, национальных ведомств по чрезвычайным ситуациям, а также национальных оборонных ведомств, обеспечивающих возможность использования производимых информационных продуктов, получаемых на основании данных, поступающих с систем этих ведомств.

Для реализации международных проектов в области охраны окружающей среды, прежде всего связанных с трансграничными проблемами, предусматривается возможность непосредственного получения информации (как оперативной, так и неоперативной) от различных источников для ее обработки и анализа.

Для функционирования МГЦЭМ необходимо обеспечить передачу данных между различными центрами и локальными потребителями с использованием существующих и создаваемых средств связи [99]. Схема организации сбора и передачи данных в системах экологического мониторинга приведена на рис. 4.

В настоящее время создана 1-я очередь Центра, при этом использован опыт деятельности Российско-Американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству [8, 16, 101].

5. Использование аэрокосмических технологий и созданных систем для мониторинга и контроля различных объектов окружающей среды

5.1. Дистанционный мониторинг прибрежных вод

С помощью разработанных технологий и созданных систем может быть организован комплексный мониторинг морских акваторий. Для этого необходима система, структура которой иллюстрируется на рис. 5.

Система включает в свой состав: средства дистанционного зондирования, установленные на космических аппаратах и орбитальных станциях; летающие лаборатории, например на базе самолетов типа ИЛ-76 и вертолетов МИ-8 и КА-32, оборудованных широким набором средств дистанционного зондирования и бортовой обработки данных, обеспечивающих получение информации о различных объектах океана; специализированные корабли экологического контроля; буйковые станции; гидроакустические системы; средства связи; высокоэффек-

тивные технические средства обработки изображений, обеспечивающие решение широкого спектра задач зон-

дирования морской среды и моделирование экосистем прибрежных вод.

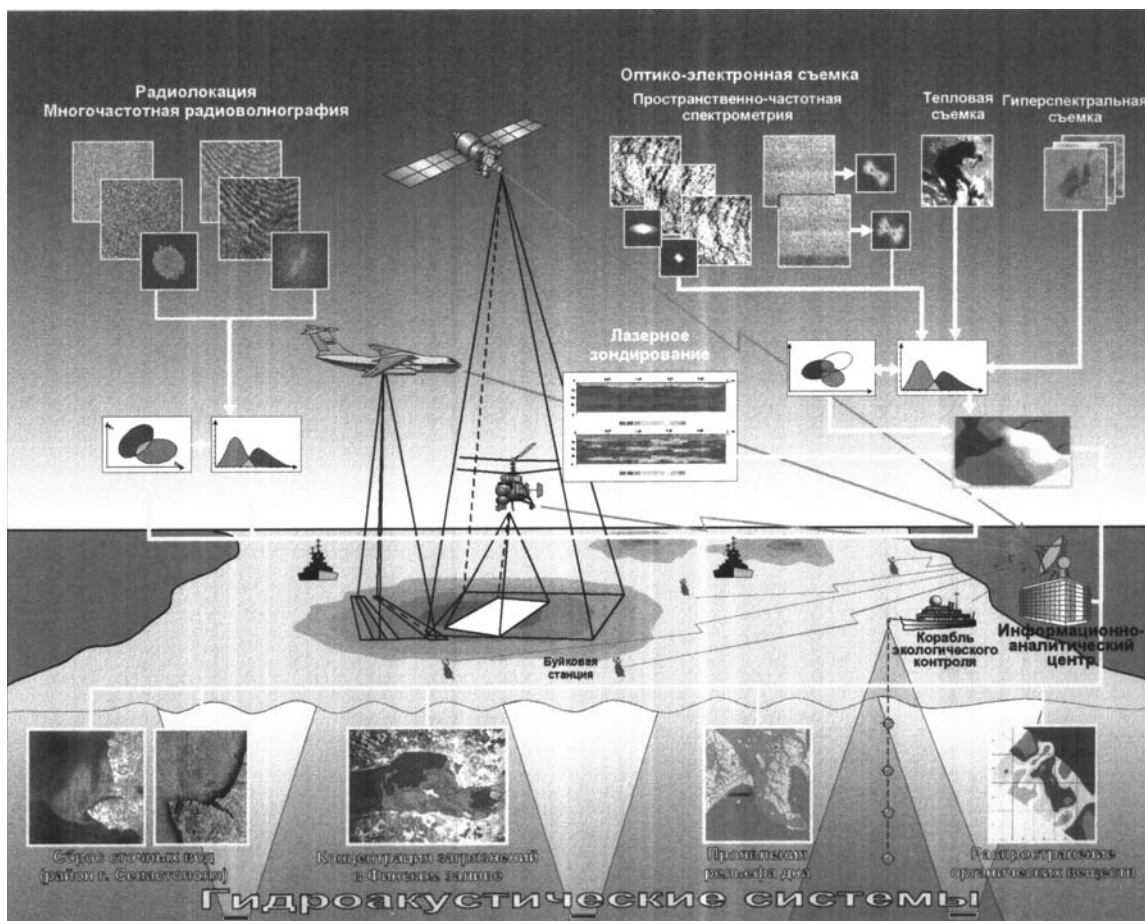


Рис. 5. Комплексная система мониторинга прибрежных акваторий

Для мониторинга водной среды используются методы и аппаратура дистанционной оптической пространственно-частотной спектрометрии, многочастотной радиоволнографии, лазерного, многоспектрального и гиперспектрального зондирования.

Система предназначена:

- для выявления в прибрежных акваториях зон загрязнений, обусловленных различными видами антропогенных воздействий, загрязнений, связанных со сбросом сточных вод, нефтепродуктами, тяжелыми металлами, растворенными органическими веществами;
- измерения физических, химических и биологических параметров водной среды, их пространственно-временных вариаций;
- анализа и прогноза развития экологических ситуаций и оценки последствий воздействия антропогенных факторов на экосистемы прибрежных вод.

Система обеспечивает наблюдение за прибрежными акваториями, обработку данных в наземных информационных центрах и передачу результатов обследований потребителям.

На основе анализа полученной информации в наземных центрах обработки с использованием алгоритмов, программных и технических средств:

- производятся идентификация существующих источников загрязнений и оценка их масштабов;

– оценивается экологический риск для экосистемы прибрежных вод, обусловленный воздействием антропогенных факторов различных типов;

– получается ценная информация для контроля климатических изменений регионального масштаба;

– разрабатываются рекомендации для принятия природоохранных мер, препятствующих дальнейшему загрязнению окружающей среды;

– создаются базы данных по характеристикам различных явлений в прибрежных регионах.

В настоящее время проведен ряд проектов с использованием фрагментов такой системы, в том числе проект по мониторингу антропогенных воздействий на экосистему Флоридского залива в рамках деятельности Экологической рабочей группы Российско-Американской комиссии по экономическому и технологическому сотрудничеству [101, 121, 123].

5.2. Мониторинг тепловых источников

Для мониторинга тепловых источников, таких, например, как извержения вулканов и лесные пожары, могут использоваться существующие и модернизируемые средства космических систем глобального наблюдения [1, 4–7].

Мониторинг этих тепловых источников основан на методах регистрации электромагнитного излучения в ИК-диапазоне спектра с помощью широкополосной аппаратуры, установленной на геостационарных высокоэллиптических, среднеорбитальных оперативных космических аппаратах, и аппаратуры высокого пространственного разрешения, установленной на низкоорбитальных космических аппаратах.

При мониторинге извержений вулканов обеспечивается возможность контролировать уровни задымленности, определять концентрацию частиц в выбросах, прогнозировать распространение шлейфа с помощью высокоорбитальных и низкоорбитальных космических аппаратов, обеспеченных аппаратурой инфракрасного диапазона.

В состав системы мониторинга лесных пожаров входят комплексы средств пожаротушения, установленные в авиационных лабораториях. Предлагаемая технология позволяет

проводить обнаружение крупномасштабных пожаров с оперативностью не более 10 с и локальных – с оперативностью не более 10 мин – 1 ч.

5.3. Наземно-космическая система краткосрочного прогноза катастрофических землетрясений

Система основана на методе многочастотного радиопросвечивания ионосферы Земли с борта космических аппаратов, приеме наземными станциями прошедшего через ионосферу излучения, на обнаружении по принимаемым сигналам предвестников землетрясений магнитудой более пяти баллов на период примерно трое суток с вероятностью правильного прогноза 0,7 и доведении оперативных сообщений до органов, ответственных за принятие решений [47, 48].

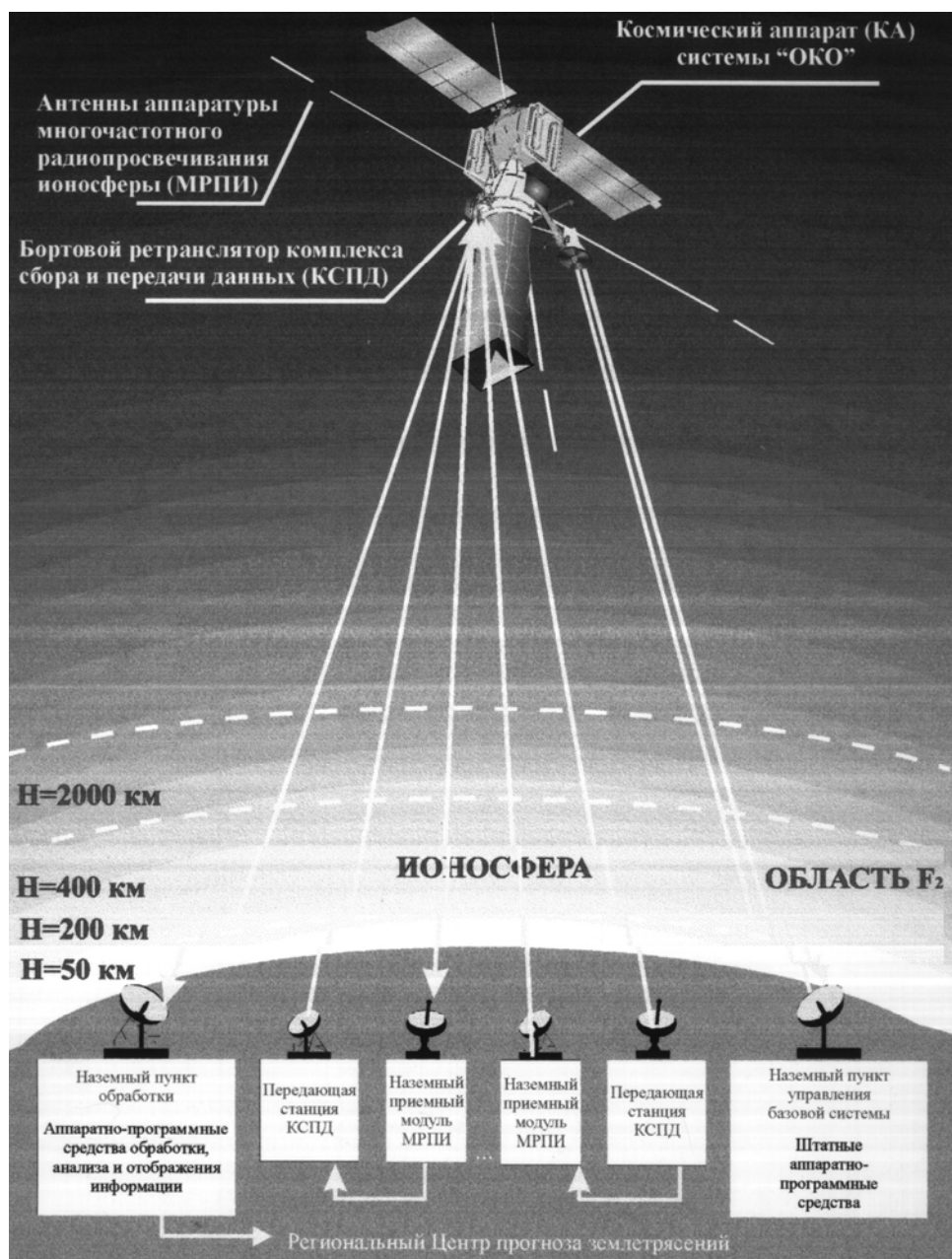


Рис. 6. Наземно-космическая система краткосрочного прогноза катастрофических землетрясений «Матрица»

В состав технических средств системы входят а) геостационарные космические аппараты (точки стояния 35 и 130° в. д.), контролирующие ионосферу в пределах $\pm 65^\circ$ по широте и долготе относительно точки стояния; б) космические аппараты дополнительно оснащаются бортовой аппаратурой многочастотного радиопросвечивания ионосферы «Матрица» и бортовой аппаратурой (ретранслятором) комплекса сбора и передачи данных миллиметрового диапазона. Общий вид космического аппарата представлен на рис. 6; в) пространственно распределенная сеть из 20–25 автоматических наземных приемных модулей сигналов радиопросвечивания, размещаемых на поверхности Земли в контролируемой зоне с шагом 300–500 км; г) сеть наземных передающих станций, топологически совмещенных с сетью приемных модулей; д) наземные пункты приема и комплексной обработки информации, сопряженные на информационном уровне с информационно-аналитическими центрами потребителей.

Предлагаемые принципы прогноза землетрясений с борта космических аппаратов апробированы экспериментально.

5.4. Мониторинг гелиогеофизической обстановки

Методы, используемые для мониторинга гелиофизической обстановки, заключаются в зондировании космической среды комплексами многочастотного радиопросвечивания ионосферы и средствами регистрации параметров электрических и магнитных полей, волн в плазме магнитосферы, энергии, плотности потоков и пространственно-временных характеристик заряженных частиц в магнитосфере с борта геостационарных и высокоэллиптических космических аппаратов [1, 5–7, 48].

С использованием предлагаемых методов могут быть решены следующие задачи:

1. Прогнозирование нарушений в работе радиолокационных систем, в том числе радиолокаторов авиадиспетчерских служб управления воздушным движением (особенно актуально в высоких широтах).

2. Прогнозирование возможных сбоев и отказов в функционировании электронной аппаратуры космических аппаратов систем управления, навигации, национального контроля, связи.

3. Прогнозирование сбоев и отказов в работе распределенных компьютерных систем, проводных и кабельных линий связи, автоматизированных систем управления и систем обеспечения безопасности эксплуатации различных экологически опасных промышленных объектов, в частности АЭС.

4. Выявление в реальном времени фактов и места проведения испытаний ядерного оружия во всех средах, включая и несанкционированные подземные ядерные взрывы.

5. Прогнозирование оптимальных частот радиосвязи в КВ- и УКВ-диапазонах радиоволн и определение текущих условий распространения радиоволн для Центров управления воздушным движением, Центров управления судами морского и рыболовного флота.

6. Прогнозирование возможности возникновения:
– чрезвычайных (аварийных) ситуаций (ЧС) на экологически опасных объектах добычи и транспортировки нефти и газа;
– токовых перегрузок и аварийных отключений в энергосетях.

7. Прогнозирование биоэффективных изменений геомагнитного поля, а также периодов неблагоприятной геофи-

зической обстановки в целях проведения профилактических мероприятий по снижению риска заболеваний населения.

5.5. Радиолокационное обнаружение радиоактивных выбросов с атомных электростанций

В процессе создания аэрокосмических систем разработан метод мониторинга радиационно опасных объектов, основанный на измерении и сравнении структуры радиолокационных сигналов при отражении от ионизированных облаков радиационных выбросов и от элементов рельефа, обычных выбросов и метеорологических облаков. Экспериментальная проверка метода была проведена в период ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в г. Гатчине, при наблюдении радиационно опасных объектов Челябинской области. Результаты натурных экспериментов показали, что метод позволяет уверенно обнаруживать радиоактивные выбросы и селектировать их на фоне метеообразований и выбросов ТЭЦ [1, 7].

Метод может применяться:

– для дистанционной оценки состояния радиационно опасных объектов по облакам их выбросов,

– дистанционного контроля радиационно-зараженных территорий по ионизированным облакам, формирующимся над ними, определения траекторий этих облаков и координат области заражения при их осаждении,

– обнаружения неизвестных и контроля известных мест захоронения радиоактивных отходов,

– поиска полезных ископаемых по изменениям радиоактивного фона и т.п.

Мониторинг экологической безопасности озер-охладителей атомных электростанций осуществляется на основе данных, полученных в результате дистанционного зондирования и моделирования, благодаря этому можно решать следующие задачи: исследовать пространственное распределение температуры поверхности озер-охладителей, исследовать временную изменчивость распределения температуры поверхности озер-охладителей в зоне сброса охлаждающей воды, оценивать экологическую опасность тепловых сбросов атомных электростанций и т.п.

6. Моделирование физических полей, обусловленных объектами окружающей среды

Как уже отмечалось выше, в процессе создания глобальных и региональных аэрокосмических систем разработаны методы моделирования на основе статистических, аналитических, структурных, структурно-статистических, структурно-лингвистических и нечетких подходов [12–15], а также созданы различные модели, том числе:

– комплексные модели полей сигналов на входе дистанционной аппаратуры различных типов глобальных информационных систем, позволяющие оценивать входные воздействия при любых условиях функционирования и районов наблюдения, имитировать любые физические поля, обусловленные объектами окружающей среды;

– пространственные спектральные модели объектов суши, облачности и морской поверхности;

– модели спектральной яркости излучения различных природных объектов в оптическом диапазоне;

– региональные географо-климатические модели Земли как планеты.

Они могут быть использованы:

- для проектирования глобальных информационно-управляющих систем в целом;
- научно обоснованного выбора технических параметров аэрокосмических систем и информационных характеристик бортовой аппаратуры;
- определения идеологии функционирования систем, выявления отличительных признаков для выделения и распознавания наблюдаемых объектов.

Технология моделирования и ее программные реализации могут использоваться в составе средств цифровой имитации информационного тракта применительно к системам глобального дистанционного мониторинга окружающей среды.

7. Моделирование антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных акваторий

С использованием предложенной методологии моделирования разработана математическая модель антропогенных воздействий на экосистемы прибрежных вод.

Экологические системы прибрежных вод относятся к классу сложных систем. Их исследование и управление могут осуществляться с помощью методов математического моделирования.

Моделирование ими экологических систем основывается главным образом на системном подходе, в котором отношения между явлениями имеют первичное, а сами явления – вторичное значение.

Универсальная математическая модель экосистемы прибрежных вод в условиях антропогенной нагрузки основывается на установленных связях между процессами различной природы: физическими, химическими, биологическими, геологическими.

Модель экосистемы характеризуется рядом параметров, определяющих входные и выходные параметры состояния, управляющие и возмущающие параметры.

К *входным* параметрам модели относятся частные модели, описывающие состояние основных компонентов экосистемы (климатическая модель региона, модель источника антропогенного воздействия, гидротермодинамическая и гидродинамическая модели, модель диффузии примесей).

К *выходным* параметрам модели относятся результаты расчетов, описывающих пространственно-временные вариации биотических компонент экосистемы и загрязняющих веществ (химических соединений, взвесей, биологических загрязнений), количественные оценки экологического риска, а также оптические, акустические, физические поля (гидрология сил).

К *возмущающим* параметрам относятся антропогенные и естественные экзогенные факторы, воздействующие на экосистемы.

К *управляющим* параметрам относится система природоохранных мероприятий (технических, законодательных, социальных), обеспечивающих эффективный режим существования экосистемы.

Модель имеет блочную трехуровневую структуру. На первом уровне моделирования учитываются отдельные процессы, устанавливаемые чаще всего эмпирически. Эти выражения написаны для законов гидромеханики, оптики, термодинамики, закономерности химических реакций, фотосинтеза, роста биомассы организмов.

Взаимодействие между процессами описывается моделями второго уровня, входящими в гидродинамический, гидробиологический и гидрохимический блоки.

Моделирование собственно экологических процессов производится с помощью модели третьего уровня, которая объединяет модели второго уровня в замкнутую систему.

Модель обеспечивает а) оценку фактического состояния экосистем прибрежных вод, б) прогноз изменений параметров экосистем, в) выявление критических ситуаций и источников экологической опасности, г) прогноз распространения загрязнений под действием различных факторов (ветра, течений, диффузии и т.д.) на достаточно длительные промежутки времени, д) оценку размеров и концентрации загрязняющих веществ, е) анализ возможных сценариев развития процессов при вариации гидрометеорологических условий, ж) выработку рекомендаций для принятия решений по нормализации экологической обстановки в конкретных регионах, з) совершенствование систем экологического мониторинга.

8. Моделирование гидродинамических возмущений морской среды, вызванных заглубленным сбросом сточных вод

На основе разработанных принципов моделирования и самих моделей создана комплексная модель, которая предназначена для оценки влияния сбросов сточных вод на прибрежные экосистемы, получения количественных характеристик изменений различных параметров водной среды, оценки возможностей дистанционной индикации этих явлений [7, 16, 22].

Комплексная модель описывает воздействие на водную среду следующих процессов, порождаемых глубинным сбросом сточных вод [7, 16, 17, 22]:

- всплывания струй примесей в условиях стратифицированной среды; модель позволяет рассчитать глубину всплытия струи, величину разбавления сточных вод, размер области, занимаемой сточными водами на некотором горизонте;
- формирования конвективных движений, обусловленных опреснением нижнего слоя среды, приводящих к образованию «солевых» пальцев;
- турбулизации слоя скачка плотности; модель определяет величину деформации слоя скачка плотности в зависимости от параметров слоя и характеристик воздействующего потока жидкости;
- образования вихревых структур; рассчитываются размеры вихрей, скорости всплывания и горизонты их подъема;
- генерации внутренних волн; оцениваются амплитуды внутренних волн, возбуждаемых глубоководным выбросом сточных вод ниже слоя термоклина.

Модель позволяет вычислить величины деформаций морской поверхности, вызываемых рассмотренными механизмами воздействия сточных вод на морскую среду, что крайне важно для оценки возможностей их дистанционной индикации. Для проведения модельных расчетов используются данные о параметрах сбросового устройства и гидрометеорологических характеристик среды в районе сброса сточных вод.

В настоящее время разработаны математические модели, адекватность которых подтверждена экспериментально, разработана блок-схема комплексной модели, ре-

лизваны модули расчета гидродинамических возмущений и модули оценки деформации поверхностного волнения.

9. Заключение

Созданный в процессе разработки таких аэрокосмических систем научный потенциал, разработанные методы, технологии и системные решения могут успешно применяться для различных областей человеческой деятельности, требующих использования высоких наукоемких технологий. Это позволит в сложных современных условиях решать множество актуальных проблем, требующих больших финансовых затрат.

В настоящей статье проиллюстрированы далеко не исчерпывающие примеры диверсификации разработанных технологий и созданных аэрокосмических систем. Неоценимый вклад в разработку фундаментальных научных основ создания этих систем внес коллектив Института оптики атмосферы РАН.

1. Савин А.И. Опыт и технологии создания глобальных информационно-управляющих систем // Аэрокосмические информационные системы. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
2. Савин А.И. Принципы построения космических систем глобального наблюдения // Исследование Земли из космоса. 1993. № 1. С. 40–47.
3. Савин А.И. Научные основы разработки систем освещения обстановки на ОТВД // Материалы научной конференции, посвященной 300-летию Российского флота. М., 1996. 15 с.
4. Savin A.I. General systems Engineering principles for space-based global observation systems // Joint U.S.–Russian Ecological / Environmental Seminar. Westfields, Washington, D.C., May 15–19, 1995. 24 p.
5. Бондур В.Г., Савин А.И. Концепция создания систем мониторинга окружающей среды в экологических и природно-ресурсных целях // Исследование Земли из космоса. 1992. № 6. С. 70–78.
6. Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических природно-ресурсных целях // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. № 2. 1995. С. 14–38.
7. Бондур В.Г. Мониторинг окружающей среды: Курс лекций. Московский государственный университет геодезии и картографии. М., 1993. 426 с.
8. Bondur V.G. Conception of the development of the global environmental monitoring system based on space means // Gore – Chernomyrdin Environmental Working Group Initiative. Proc. of the Global Environmental Disaster Monitoring Subgroup Meeting. Rosslyn, Virginia, 5–7 December, 1995. 32 p.
9. Крохин В.В. Информационно-управляющие космические радиолинии. М.: НИИЭИР, 1993. Ч. I. 230 с. Ч. II. 240 с.
10. Зуев В.Е. История создания и становления академической науки в Томске. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
11. Зуев В.Е. Лазер-метеоролог. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 179 с.
12. Бондур В.Г., Савин А.И. Принципы моделирования полей сигналов на входе аппаратуры ДЗ аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды // Исследование Земли из космоса. 1995. № 4. С. 24–34.
13. Бондур В.Г. Методы моделирования полей излучения, регистрируемых аэрокосмическими системами дистанционного зондирования (В печати).
14. Бондур В.Г. Дистанционная оптическая пространственно-частотная спектрометрия в задачах создания аэрокосмических систем глобального наблюдения. М.: ЦНИИ «Комета», 1990. 501 с.
15. Бондур В.Г. Модели полей излучения для систем дистанционного зондирования: Курс лекций. Московский государственный университет геодезии и картографии. М., 1991. 389 с.
16. Bondur V.G. Techniques and systems of monitoring of anthropogenic impact on coastal ecosystems // Gore – Chernomyrdin Environmental Working Group Initiative. Proceedings of the Global Environmental Disaster Monitoring Subgroup Meeting. Rosslyn, Virginia. 16–17 September, 1995. 24 p.
17. Бондур В.Г. Методы дистанционного мониторинга антропогенных воздействий на морские акватории // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
18. Бондур В.Г., Лазарев А.И., Савин А.И. Физические основы создания аэрокосмических систем мониторинга окружающей среды. СПб., 2000. 396 с.
19. Бондур В.Г. Синтез двумерных стохастических полей яркости методом фазового спектра // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
20. Bondur V.G. Databases Related to characterization of Various Environmental Objects. Joint U.S. – Russian Ecological/Environmental Seminar. Washington, D.C. May 15–19, 1995. 29 p.
21. Бондур В.Г., Лонский И.И., Остапенко Е.А. Модель видеобазы для обеспечения экологического мониторинга // Изв. вузов. Сер. Геодезия и аэрофотосъемка. 1993. № 1,2. С. 147–159.
22. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Комплексная модель возмущений морской среды, вызванных заглубленным сбросом сточных вод // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
23. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В. Дистанционные методы определения рельефа дна в прибрежных зонах морей и океанов / Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
24. Баханов В.В., Троицкая Ю.И. Дистанционная диагностика неоднородностей дна в области шельфа // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
25. Шамаев С.И. Моделирование сложных физических явлений на основе индуктивной интуиционистской логики (ИИЛ). Сходство и различие ИИЛ-процессоров и нейрокомпьютерных сетей // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
26. Бондур В.Г., Аржененко Н.И., Тутова И.Л. Дистанционная пространственно-частотная спектрометрия объектов атмосферы и суши. Двумерная пространственная спектральная модель фона Земли // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
27. Бондур В.Г., Красоткин В.С., Прокофьева В.В. Оптические модели газопылевых образований в атмосфере Земли // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
28. Зуев В.Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981. 288 с.
29. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
30. Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Пономарев Ю.Н. Спектроскопия атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 250 с.
31. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.
32. Аржененко Н.И., Кузнецова Т.В., Максимова Н.И. Региональная географо-климатическая модель фона Земли для космических систем глобального наблюдения // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
33. Bondur V.G., Murinin A.B. Restoration of Surface Wave Spectra from the Spectra of Images with the Account for Nonlinear Modulation of the Brightness Field // Atmospheric optics. 1991. V. 4. № 4. P. 387–393.
34. Bondur V.G., Kulakov V.V., Murinin A.B. Optical Images of Natural Formations Synthesized Numerical Simulations of Spatial Nonuniform Sea Surface // Theses of 14-th International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. Leningrad, 1991. V. 3. P. 27.
35. Bondur V.G., Murinin A.B. Images of Natural Formations Synthesized Numerically with Definite 2-D spectra // Theses of 14-th International Conference on Coherent and Nonlinear Optics. Leningrad, 1991. V. 1. P. 11–12.

36. *Бондур В.Г., Аржененко Н.И., Линник В.Н., Титова И.Л.* Синтез многоспектральных изображений пространственно-неоднородных динамических полей яркости // *Аэрокосмические информационные системы*. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
37. *Аржененко Н.И., Бондур В.Г., Котелевский Д.Е., Титова И.Л.* Синтез многоспектральных полей яркости на входе дистанционной аппаратуры // *Материалы 1-го Межреспубликанского симпозиума «Оптика атмосферы и океана»*. Томск, 1994.
38. *Аржененко Н.И., Титова И.Л., Линник В.Н., Максимова Н.И.* Моделирование рельефа облачности применительно к задаче синтеза стохастических полей яркости // *Аэрокосмические информационные системы*. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
39. *Бондур В.Г.* Оперативная дистанционная оценка состояния границы раздела атмосфера – океан по пространственным спектрам изображений // *Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы*. Новосибирск: Наука, 1987.
40. *Бондур В.Г.* Оперативная дистанционная пространственно-частотная спектрометрия поверхности океана: Тезисы докл. 6-й Всесоюзной школы-семинара по обработке информации. Фрунзе, 1986.
41. *Шамаев С.И.* Многочастотная компьютерная радиотомография океана // *Вопросы радиоэлектроники*. 1994. № 2. С. 3–12.
42. *Методы, процедуры и средства аэрокосмической компьютерной радиотомографии приповерхностных областей Земли* / Под ред. С.В. Нестерова, А.С. Шамаева, С.И. Шамаева. М.: Научный мир, 1996. 272 с.
43. *Пожидавев В.М.* Радиолокационные методы диагностики загрязнения подстилающей поверхности с аэрокосмических носителей // *Аэрокосмические информационные системы*. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
44. *Пожидавев В.М.* Экспериментальные авиационные радиолокационные средства для наблюдений загрязнений морской среды // *Аэрокосмические информационные системы*. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
45. *Бондур В.Г., Зубков Е.В.* Лидарные методы дистанционного зондирования загрязнений океана // *Аэрокосмические информационные системы*. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
46. *Белл Р.Дж.* Введение в Фурье-спектроскопию: Пер. с англ. / Под ред. Г.Н. Жижина. М.: Мир, 1975. 380 с.
47. *Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических методов* / Под ред. В.Н. Страхова, В.А. Линеровского. М., 1998. 164 с.
48. *Болотов С.М., Бондур В.Г., Власко-Власов К.А., Гвишивили Г.В., Малютин В.Н., Мигулин В.В., Пирогов Ю.А., Савин А.И., Страхов В.Н.* Космическая система прогнозов катастрофических землетрясений и опасных геофизических процессов // *Аэрокосмические информационные системы*. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
49. *Архипов С.А., Кузнецов Э.Я., Лезгезо Л.С.* Космический комплекс обеспечения экологической безопасности в околоземном пространстве // *Аэрокосмические информационные системы*. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
50. *Бондур В.Г., Воляк К.И.* Оптический пространственный спектральный анализ изображений морской поверхности. Исследование по гидрофизике // *Тр. ФИАН СССР*. М.: Наука, 1984. С. 63–78.
51. *Арумов Г.П., Бондур В.Г. и др.* Пространственный спектральный анализ радиолокационных и фотографических изображений морской поверхности при наличии нефтяных загрязнений. 1981. 19 с. (Препринт / ИКИ АН СССР, Пр-616).
52. *Бондур В.Г., Мурынин А.Б.* Восстановление спектров поверхностного волнения по спектрам изображений с учетом нелинейной модуляции поля яркости // *Оптика атмосферы*. 1991. Т. 4. № 4. С. 387–393.
53. *Лазарев А.И., Коваленок В.В., Авакян С.В.* Исследование Земли с пилотируемых космических кораблей. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 400 с.
54. *Лазарев А.И., Коваленок В.В., Савиных В.П.* Визуально-инструментальные наблюдения с «Салюта-6». Л.: Гидрометеоздат, 1983. 136 с.
55. *Виллманн Ч.И., Лазарев А.И., Леонов А.А.* Наблюдения мезосферных облаков из космоса на ночной стороне Земли // *Метеорологические исследования. Физика мезосферы и мезосферных облаков*. 1975. № 22. С. 144–147.
56. *Лазарев А.И., Николаев А.Г., Хрунов Е.В.* Оптические исследования в космосе. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 255 с.
57. *Лазарев А.И., Коваленок В.В., Иванченков А.С., Авакян С.В.* Атмосфера Земли с «Салюта-6». Л.: Гидрометеоздат, 1981.
58. *Бондур В.Г., Калери А.Ю., Лазарев А.И.* Наблюдение Земли из космоса. Орбитальная станция «Мир», март – август, 1992. СПб.: Гидрометеоздат, 1997.
59. *Лазарев А.И., Бондур В.Г., Коптев Ю.И. и др.* Космос открывает тайны Земли. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. 240 с.
60. *Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики пенных образований на взволнованной морской поверхности // *Океанология*. 1982. Т. 29. № 3. С. 372–379.
61. *Бондур В.Г., Шарков Е.А.* Статистические характеристики элементов линейной геометрии пенных структур на поверхности моря по данным оптического зондирования // *Исследование Земли из космоса*. 1986. № 4. С. 21–31.
62. *Аржененко Н.И., Бондур В.Г.* Распознавание природных образований по результатам зондирования из космоса // *Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы*. Новосибирск: Наука, 1987. С. 208–217.
63. *Опенхайм А.В., Лим Д.С.* Важность фазы при обработке сигналов // *ТИИЭР*. 1983. Т. 69. № 5. С. 39–53.
64. *Веселов Д.П., Лобанова Г.И., Мирзоева Л.А., Попов О.И., Семенова В.И.* Влияние аэрозоля на спектральноэнергетические характеристики излучения земной поверхности, тропосферных облаков и атмосферы в диапазоне 1–3 мкм при наблюдении из космоса // *Оптический журнал*. 1999. № 4.
65. *Лобанова Г.И., Федорова Е.О.* Спектральная зависимость показателя рассеяния аэрозоля на высотах до 30 км в области 1,1–3,2 мкм // *Исследование Земли из космоса*. 1998. № 1. С. 29–33.
66. *Веселов Д.П., Лобанова Г.И., Попов О.И., Федорова Е.О.* Спектральные и угловые характеристики отражательной способности ледяных и водяных облаков // *Исследования Земли из космоса*. 1998. № 1. С. 38–42.
67. *Федорова Е.О., Лобанова Г.И., Семенова В.И.* О яркости неба в области полосы свечения молекулярного кислорода 1,27 мкм при наблюдении с высот до 30 км // *Изв. АН СССР. Геомагнетизм и аэрномия*. 1974. Т. 14. № 6. С. 1061–1064.
68. *Решетникова И.С., Федорова Е.О.* Исследование оптических характеристик тропосферы и нижней стратосферы // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО*. 1978. Т. 14. № 11. С. 1150–1159.
69. *Веселов Д.П., Попов В.И.* Сравнение измеренных из космоса ИК-спектров излучения облаков с результатами расчетов // *Исследование Земли из космоса*. 1998. № 2. С. 30–34.
70. *Киселева М.С., Непорент Б.С., Федорова Е.О.* Поглощение ИК-радиации при неразрешимой структуре спектра для наклонных путей в атмосфере (действие H₂O и CO₂) // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО*. 1967. Т. 3. № 6. С. 640–653.
71. *Чатурский Л.И.* Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400–2500 нм. Ч. 1. М.: Прогресс, 1979. 368 с.
72. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоздат, 1985. 375 с.
73. *Басович А.Я., Баханов В.В., Таланов В.И.* Трансформация спектров ветрового волнения короткими цугами внутренних волн // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО*. 1987. Т. 23. № 7. С. 694–706.
74. *Басович А.Я., Баханов В.В., Браво-Животовский Д.М. и др.* Воздействие коротких цугов интенсивных внутренних волн // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО*. 1986. Т. 22. № 11. С. 1194–1203.
75. *Ермаков С.А., Пелиновский Е.Н., Талпина Т.Г.* Пленочный механизм воздействия внутренних волн на ветровую рябь // *Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность* / Под ред. Е.Н. Пелиновского. Горький: ИПМ АН СССР, 1982. С. 31–51.
76. *Моисеев С.С., Пунгин В.Г., Суязов Н.В., Эткин В.С.* «Взрывное» взаимодействие волн нулевой энергии в невязких сдвиговых течениях // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО*. 1984. Т. 20. № 9. С. 842–847.
77. *Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Радиометрическая диагностика океана // *Дистанционные методы исследования океана*. Горький: ИПФ АН СССР, 1987. С. 34–58.

78. Баренблатт Г.И. Динамика турбулентных пятен и интрузий в устойчиво стратифицированной жидкости // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 14. № 2. С. 195–205.
79. Лучинин А.Г., Титов В.И. Оптические изображения внутренних волн // Воздействие крупномасштабных внутренних волн на морскую поверхность. Горький, 1982. С. 92–110.
80. Бункин Ф.В., Воляк К.И., Михалевич В.Г. и др. Измерение параметров морского волнения по статистике отраженного лазерного сигнала // Труды ИОФАН. Т. 1. Дистанционное зондирование океана. М.: Наука, 1986. С. 3–23.
81. Бондур В.Г., Борисов Б.Д. и др. Поле яркости морской поверхности при искусственном импульсном освещении // Перенос изображения в земной атмосфере. Томск: Томский филиал СО АН СССР, 1988. С. 42–45.
82. Арумов Г.П., Бондур В.Г., Попов А.Е. и др. Пространственный спектральный анализ оптических и радиолокационных изображений морской поверхности при наличии нефтяных загрязнений. 1981. 19 с. (Препринт / ИКИ АН СССР, Пр-616).
83. Барановский В.Д., Бондур В.Г., Кулаков В.В., Малинников В.А., Мурынин А.Б. Калибровка дистанционных измерений двумерных пространственных спектров волнения по оптическим изображениям // Исследования Земли из космоса. 1992. № 2. С. 59–67.
84. Носов В.Н., Пашин С.Ю., Симановский Я.О. Оптическая регистрация гидродинамических возмущений поверхностного волнения // Вопросы судостроения. Сер. Акустика. 1983. Вып. 17. С. 32–38.
85. Аванесова Г.Г., Воляк К.И., Шуган И.В. Измерения характеристик волнения самолетным локатором бокового обзора // Исследования по гидрофизике: Труды ФИАН СССР. М.: Наука, 1984. С. 63–78.
86. Литовченко Ц.Г., Улиско Т.Н. Моделирование нейронной структуры для выявления развивающихся образов // Аэрокосмические информационные системы. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
87. Тотмаков С.Г. Помехоустойчивая обработка космических изображений // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
88. Бондур В.Г., Кулаков В.В., Лобзенкова Н.П. Алгоритмы классификации пространственных спектров изображений в оптико-цифровых системах обработки // Тезисы докл. 6-й Всесоюзной школы-семинара по оптической обработке информации. Фрунзе, 1986. С. 148.
89. Бондур В.Г., Власенко В.А. Методы и устройства обработки изображений в задачах распознавания пространственных спектров морской поверхности // Вопросы радиоэлектроники. 1987. Вып. 7. С. 37–52.
90. Бондур В.Г., Власенко В.А., Крылов В.Н. Предварительная обработка изображений в субперцептуальном пространстве // Вопросы радиоэлектроники. 1990. Вып. 12. С. 43–54.
91. Бондур В.Г., Старченко С.А. Унифицированное программно-алгоритмическое обеспечение обработки и классификации аэрокосмических изображений // Аэрокосмические информационные системы. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
92. Бондур В.Г., Кулешов Ю.П., Савин А.И. Комплекс оптико-цифровой обработки аэрокосмических изображений с высоким информационным содержанием // Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по лазерному зондированию атмосферы. Томск, 1985. С. 87.
93. События, время, люди / Под ред. А.И. Савина. М.: ЦНИИ «Комета», 1996. С. 126.
94. Российская наука – Военно-морскому флоту / Под ред. А.А. Саркисова. М.: Наука, 1997. С. 400.
95. Гореликов А.В., Крохин В.В., Шеглов К.С. Приемопередающие антенные посты наземных станций глобальных информационно-управляющих систем // Аэрокосмические информационные системы. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
96. Беляев В.В., Крохин В.В. Принципы построения компактных автономных наземных информационно-управляющих станций высокой заводской готовности и особенности их реализации // Аэрокосмические информационные системы. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
97. Закон М.Б., Мальшев В.Л., Савин А.И. Региональная система спутниковой связи «Зеркало-КС» (В печати).
98. Савин А.И., Закон М.Б. Спутниковая система связи «Зеркало-КС» // Деловой мир. 8–14 мая 1995.
99. Бондур В.Г., Литовченко Д.Ц., Савин А.И. Расширение функциональных возможностей и сопряжение с наземными сетями космических систем связи с антеннами большого диаметра // Аэрокосмические информационные системы. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
100. Медзмирашвили Э.В. Трансформируемые конструкции в космосе и на Земле. Тбилиси, 1995. С. 446.
101. Богданов П.К., Бондур В.Г., Данилов-Данильян В.И., Новоселова О.А., Савин А.И. Общие подходы к созданию Единой государственной системы экологического мониторинга и интеграции ее в международные системы // Аэрокосмические информационные системы. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
102. Бондур В.Г., Кулешов Ю.П., Савин А.И. Информационные системы экологического мониторинга и контроля чрезвычайных ситуаций на урбанизированных территориях // Аэрокосмические информационные системы. Т. 1. М.: Наука, 1999. 486 с.
103. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я. Приоритеты глобальной экологии. М.: Наука, 1992. С. 264.
104. Кондратьев К.Я. Глобальный климат. Л.: Наука, 1992. 359 с.
105. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. М.: Гидрометеиздат, 1984. С. 560.
106. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. Антропогенная экология океана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 528 с.
107. Голицин Г.С. Изменения климата в XX и XXI столетиях // Физика атмосферы и океана. Т. 22. № 12. 1986. С. 1235–1252.
108. Антропогенные изменения климата / Под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 406 с.
109. Монин А.С. Введение в теорию климата. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 246 с.
110. Reviews // Centre J. Common Future. Geneva, 1992. 46 p.
111. Gadd A.J. Scientific statements and the Rio Earth Summit // Weather. 1992. V. 57. № 8. P. 294–315.
112. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 486 с.
113. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
114. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 256 с.
115. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Российской Федерации в 1997 г.». М.: Госкомэкологии России, 1998. С. 608.
116. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Российской Федерации в 1998 г.». М.: Госкомэкологии России, 1999. С. 598.
117. Кондратьев К.Я., Данилов-Данильян В.И., Донченко В.К., Лосев К.С. Экология и политика. СПб.: Научный центр РАН, 1993. С. 286.
118. Кондратьев К.Я., Донченко В.К., Лосев К.С., Фролов А.К. Экология – экономика – политика. СПб.: Научный центр РАН, 1996. С. 827.
119. Bondur V.G., Danilov-Danilyan V.I., Savin A.I. Environmental global monitoring. Perspectives of intergovernmental cooperation // Proc. of the geo-informatics conference of the international Eurasian Academy of sciences and the fourth international workshop on geographical information system. August 18–22, 1997. Beijing, China. V. 3. P. 1191–1200.
120. Материалы Общевропейского межправительственного совещания «Развитие системы экологического мониторинга в Европейском регионе». 8–9 декабря 1999 г., Россия. М.: Госкомэкологии России, 1999. 356 с.
121. Бондур В.Г. Необходимость и возможность организации комплексного экологического мониторинга. Интеграция потоков информации от различных источников (наземные, космические, воздушные) // Материалы Общевропейского межправительственного совещания «Развитие системы экологического мониторинга в Европейском регионе». 8–9 декабря 1999 г., Россия. М.: Госкомэкологии России, 1999. 356 с.

122. *Соглашение о сотрудничестве в области экологического мониторинга*. Минск: Исполнительный комитет государств – участников СНГ, 1999. 10 с.
123. *Бондур В.Г., Литовченко Д.Ц., Старченков С.А.* Дистанционный мониторинг отмирания морской травы и мангровых зарослей во Флоридском заливе // *Аэрокосмические информационные системы*. Т. 2. М.: Наука, 1999. 496 с.
124. *Зуев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В.* Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 272 с.
125. *Зуев В.Е., Землянов А.А., Копытин Ю.Д.* Нелинейная оптика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 256 с.
126. *Зуев В.Е., Наац И.Э.* Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 286 с.
127. *Зуев В.Е., Зуев В.В.* Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
128. *Зуев В.Е., Титов Г.А.* Оптика атмосферы и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1996. 272 с.

A.I. Savin and V.G. Bondur. Scientific fundamentals of creation and diversification of global aerospace systems.

Basic scientific and technical problems have been solved during more than 50 year history of creation and operation of global aerospace systems of various purpose. Their systematization is presented in this paper.