

# ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В ЗАДАЧАХ КОСМИЧЕСКОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Т.А. Сушкевич, В.В. Козодеров, Т.В. Кондранин, С.А. Стрелков, Е.В. Дмитриев, С.В. Максакова

В настоящей работе речь идет о новых перспективных направлениях развития и использования распределенных вычислений на суперкомпьютерах и ГРИД и «облачных» систем для распределенной инфраструктуры коллективного использования данных космического дистанционного зондирования Земли.

С 1989 года коллектив проводит работы по проблемам распараллеливания вычислений при решении больших задач в атмосферно-оптических космических исследованиях, в аэрокосмическом дистанционном зондировании (Remote sensing), в проблемах климата, прогноза, радиационного баланса Земли и т.д., связанных с математическим моделированием переноса излучения в природных и искусственных средах и радиационного поля Земли в широком диапазоне спектра длин волн от ультрафиолета (УФ) до миллиметровых волн (ММВ). Однако впервые параллельные вычисления были реализованы в 1966 году [1] на ЭВМ БЭСМ-6 путем специального разбиения разностной сетки на непересекающиеся подобласти и использования времени обмена с магнитными лентами. Накоплен огромный опыт по проблемам переносимости, адаптации, наследования программного обеспечения при освоении различных многопроцессорных вычислительных систем кластерного типа и суперкомпьютеров. По-прежнему имеет место проблема соблюдения международных стандартов и универсальности операционного обеспечения и компиляторов Fortran. В мировой практике космической отрасли предпочтение отдается Fortran, чтобы обеспечить преемственность не только специального тематического программного обеспечения, но и масштабных баз данных как характеристик параметров атмосферы, земной поверхности, океана, так и архивов радиационных характеристик.

Новые перспективные возможности математического моделирования атмосферной радиации Земли для решения прямых и обратных задач на основе кинетического уравнения переноса излучения и гиперспектрального дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли связаны не только с разработкой универсальной информационно-математической системы для широкой области приложений на суперкомпьютерах и кластерах с распараллеливанием супервычислений и распределением ресурсов, но и с созданием и развитием международных ГРИД-систем и тематических «облачных» систем. В интересах обеспечения оперативного космического глобального, регионального и локального экологического мониторинга и систем космического землеобзора в интересах оперативного обнаружения предвестников катастроф и чрезвычайных ситуаций, а также прогнозирования и оценки их последствий не случайно в центрах НАСА (США) и в центрах по исследованию климата и катастроф Японии, Китая, ЕС и др. центрах с 2004 года запустили самые мощные параллельные компьютеры. Необходимо отметить, что сложные большие трудоемкие многомерные задачи пока что предпочтительнее использовались для выполнения стратегических космических проектов и их актуальность в перспективе возрастает.

Гигантский научно-технический прогресс и беспрецедентный рост влияния человека на природу в 70-е - 90-е годы XX века привели ученых всего мира, занимающихся анализом нарастающих антропогенных и естественно-природных воздействий на окружающую среду, к выводу: решение задач объективного контроля и прогнозирования качества окружающей среды возможно лишь при создании единой международной системы мониторинга на основе эффективных средств сбора и переработки информации.

Важный шаг – разработка глобальных Геоинформационных Мониторинговых Систем (ГИМС) нового поколения с нарастающей ролью математического аппарата и информационных технологий, отражающих междисциплинарные исследования с многоцелевыми информационно-измерительными функциями и различного рода информацией (ретроспективной, текущей, прогнозной, рекомендательной), включают две части:

- система сбора информации (спутники, плавающие и летающие лаборатории, наземные станции);
- Центры обработки информации.

Ключевые вопросы ГИМС:

- Информационно-наблюдательная система EOS (Earth Observing System) как техническое воплощение ГИМС, причем преобладает космическая система наблюдений (в частности, из-за космических данных двойного назначения), наземные наблюдения используются для выборочной верификации;
- Информационные технологии и математическое моделирование (прямые и обратные задачи) как инструменты обработки аэрокосмической и наземной информации и вскрытия внутренних связей в природе, заменяя многие исследования on-site на эксперимент с моделью!

Принципиальная новизна современного космического землеведения:

- От отдельных космических аппаратов и отдельных космических экспериментов переход к международной космической системе и тематическому мониторингу на основе гиперспектральных данных дистанционного зондирования с использованием наноспутников;
- Глобальные модели процессов и комплексные исследования наиболее представительных депрессионных регионов (Бразилия, Юго-Восток, Африка, Ростов-на-Дону, Кубань);
- Международное сотрудничество и кооперация космических систем землеобзора, систем приема космических данных, первичной обработки, архивации, информационных технологий поиска, хранения, обработки и анализа космических данных;
- Прием космических данных с зарубежных и международных космических аппаратов.

Международные междисциплинарные исследования системы "Природа-Общество" проводятся в рамках международных программ

- International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP);
- The World Climate Research Programme (WCRP);
- Surface Ocean Lower Atmosphere Study (SOLAS);
- Global Water Experiment (GEWEX);
- Global Analysis, Integration and Modelling (GAIM);
- Earth Models of Intermediate Complexity (EMIC) - глобальная модель взаимодействия атмосферы, геосферы, наземной биоты, океанов и человеческого общества.

По инициативе Национальной администрации космонавтики и авиации США (NASA) и Российской академии наук совместно с Агентством Роскосмоса выполняется проект NEESPI – это Инициатива партнерства в области наук о Земле в Северной Евразии:

- ключевые научные вопросы и координация исследований состояния и динамики наземных экосистем в Северной Евразии и их взаимодействия с биосферой, атмосферой, гидросферой и климатической системой Земли для совершенствования научных представлений и развития прогностических возможностей с целью обоснования принимаемых решений и практических применений;
- интегрирование потенциала научно-исследовательских организаций, информационных ресурсов и инфраструктуры, имеющиеся в России и других странах Северной Евразии.

Вопросы динамики социально-экономического развития и глобальных изменений окружающей среды связаны с проблемами природных стихийных и антропогенно обусловленных бедствий и катастроф, а также с катастрофами "замедленного действия" (изменение климата, истощение озонового слоя, опустынивание, обезлесивание, подъем уровня Мирового океана, уменьшение биоразнообразия и т.д.).

Для диагностики и прогнозирования требуется серьезное исследование глобальных систем наблюдений и численное моделирование возможности дистанционного зондирования и мониторинга на основе "сценариев" развития в атмосфере и на земной поверхности техногенных чрезвычайных аварий и естественно-природных катастроф.

Всемирная система мониторинга и иерархия моделей – главные инструменты для прогнозирования изменений в природных процессах и разделения естественных и антропогенных воздействий.

Интерес к проблеме переноса излучения в природных средах в последнее время заметно возрос в связи с разработками космических систем глобального мониторинга Земли и многосторонним анализом физических, химических, метеорологических, биофизических процессов, ответственных за формирование радиационного поля Земли. В масштабах планеты стоит актуальная проблема создания международного глобального мониторинга Земли с целью исследования её эволюции и прогнозирования естественно-природных стихийных бедствий и антропогенно-техногенных катастрофических процессов.

Это грандиозные задачи, решение которых требует разработки нанотехнологий для космических проектов, в частности, развитие гиперспектральных систем дистанционного зондирования и нанодиагностики природно-техногенной сферы, и в интересах международной кооперации по аэрокосмическому и наземному глобальному мониторингу Земли, международного глобального проекта по изучению эволюции Земли, климата и опасных явлений требуется разработка нового информационно-математического обеспечения для решения прямых и обратных задач теории переноса излучения в природных средах, реализуемого на высокопроизводительных многопроцессорных супер-ЭВМ.

Сложность космических исследований и реализации космических проектов обусловлена тем, что приходится иметь дело с "замкнутым кругом":

- чтобы с космического аппарата измерить характеристики радиационного поля Земли, нужны предварительные оценочные расчеты этих характеристик на основе моделей теории переноса излучения с учетом многократного рассеяния и поглощения солнечного и собственного излучения,
- чтобы смоделировать перенос излучения в системе "атмосфера - земная поверхность - океан", нужны данные о пространственных и спектральных распределениях оптико-геофизических

параметров атмосферы и океана, описывающих взаимодействие солнечного и собственного излучения с компонентами земной атмосферы и океана и земной поверхностью.

Следует обратить внимание на несогласованность теории переноса с реальными возможностями натуральных измерений. Практически отсутствуют способы одновременного экспериментального определения всего комплекса входящих в теорию физических параметров среды и тем более их изменчивости для данных конкретных, непрерывно меняющихся ситуаций в реальной окружающей среде. Поэтому физико-математическое моделирование для восполнения знаний о реальных радиационных процессах, их анализа и прогнозирования является необходимой составной частью любого космического проекта и глобальных моделей циркуляции атмосферы и океана, климата или метеорологии.

Возрастает роль "космического земледения" [2, 3] как той дисциплины, которая объединяет усилия различных специалистов и позволяет им всем вместе "заговорить" на общем языке космических исследований. "Космическое земледение" - это оперативная информация о стихийных бедствиях и экологических катастрофах антропогенно-техногенного и естественно-природного происхождения и космический мониторинг глобальных изменений окружающей среды, включая экологические катастрофы замедленного действия. В России уже более 30 Центров приема космической информации, а Центры обработки и анализа информации находятся в стадии формирования и становления. В марте 2003 года вышло Постановление Правительства РФ об организации государственного экологического мониторинга окружающей среды. В октябре 2005 вышла Федеральная программа по космосу и в настоящее время разрабатывается развитие этой программы на перспективу до 2020 года. Одно из важных направлений Федеральной программы по космосу связано с использованием космических данных для оптимального управления регионами с целью обеспечения их устойчивого развития [4].

Радиационное поле Земли формируется под влиянием двух компонент системы "атмосфера - земная поверхность (суша, океан)" (САП). Связи между радиационными характеристиками и параметрами атмосферы и земной поверхности описываются решениями общей краевой задачи теории переноса излучения в САП, когда важно использовать теорию многократного рассеяния [5, 6]. Сложность задачи заключается в многопараметричности модели среды, большом разнообразии процессов трансформации энергии Солнца, вариантов визирования и способов измерений. Приходится иметь дело с общими краевыми задачами для интегро-дифференциального кинетического уравнения, описывающего перенос излучения в рассеивающих, поглощающих, излучающих, преломляющих, поляризующих средах с одномерной, двумерной или трехмерной плоской или сферической геометрией. Используется линеаризованное уравнение Больцмана в приближении бинарных столкновений, основанном на дуализме "волна-частица". Теория переноса позволяет изучать влияние различных факторов на прохождение излучения в САП и получать связи конкретных параметров среды с характеристиками радиационного поля.

Для космических проектов и космических наблюдений с первых шагов освоения космического пространства необходимо было разрабатывать методологию решения двух основных классов многомерных задач теории переноса излучения :

- прежде всего для многомерной сферической оболочки (сферическая Земля с атмосферой),
- а позже для 3D плоского слоя (атмосфера над земной поверхностью), с двумя типами источников:
- внешним параллельным потоком солнечного (ультрафиолетового, коротковолнового) излучения,
- собственным (длинноволновым, инфракрасным, миллиметровым) излучением.

Используются следующие приемы распараллеливания вычислений:

- 1) распределенные вычисления по физическим моделям (для ГРИД- и «облачных» систем):
  - многоспектральные (по спектру длин волн);
  - по оптико-геофизической погоде (по коэффициентам общей краевой задачи);
  - по источникам излучения;
- 2) распределенные вычисления на основе методического распараллеливания - декомпозиции краевых задач:
  - по моделям переноса излучения, т.е. по приближениям теории переноса излучения;
  - по подобластям;
  - по параметрам вектора функций влияния;
  - по параметрам вектора пространственно-частотных характеристик;
  - по компонентам векторных функционалов;
- 3) алгоритмическое распараллеливание для многомерных моделей:
  - однократное рассеяние по характеристикам;
  - многократное рассеяние по интегралам столкновений;
  - по квадрантам угловых разностных сеток;
  - по подобластям с разными сеточно-характеристическими схемами.

НОВОЕ направление распределенных вычислений связано с созданием Международной аэрокосмической системы мониторинга глобальных явлений в интересах краткосрочного прогнозирования природных и техногенных катастроф (МАКСМ) - насущная и актуальная современная задача (IGMASS – International Global Monitoring Aerospace System). МАКСМ как «система систем» строится на принципах формирования специализированной глобальной, интегрированной мониторинговой сети, в рамках которой предполагается функционально объединить информационные, навигационные и телекоммуникационные ресурсы традиционных космических систем национальной, региональной и международной принадлежности и одновременно создать собственный специализированный потенциал для сбора, комплексной обработки и интерпретации разнородных данных о признаках приближающихся природных стихийных бедствий и техногенных катастроф на основе комплексного использования наземных, авиационных и космических средств. Учитывая тот факт, что на МАКСМ предлагается возложить комплексное решение задач оперативного и краткосрочного прогноза разрушительных природных явлений и техногенных катастроф, она способна стать той системообразующей идеей, которая, в случае своей практической реализации обозначит начало новой, единой стратегии освоения космоса – направленной на обеспечение экологически безопасного и социально устойчивого развития всего мирового сообщества с опорой на общие, непреходящие ценности сохранения жизни на Планете.

Впервые в Конкурсе междисциплинарных фундаментальных исследований офи\_м РФФИ появилась Тема исследований: 19. - Фундаментальные проблемы создания распределенной инфраструктуры коллективного использования данных космического дистанционного зондирования Земли

Направление исследований: 19.04. - Разработка математических методов, вычислительных алгоритмов и информационных технологий обработки, анализа и распознавания изображений ДЗЗ.

Большая часть поддержанных проектов посвящена проблемам информационных технологий:

Распределенный информационный ресурс коллективного пользования для комплексного анализа данных космического дистанционного зондирования; Распределенная инфраструктура коллективного пользования, обеспечивающая интеграцию информационных систем при решении задач хранения, поиска; Распределенная система для интеграции данных дистанционного зондирования в интересах наук о Земле; Разработка GRID-системы и вычислительных сервисов для исследования геодинамических пространственно-временных процессов по данным ДЗЗ; Фундаментальные проблемы создания распределенной инфраструктуры коллективного использования данных космического дистанционного зондирования Земли на примере систем оперативного спутникового мониторинга; Оптимизация математических моделей описания и представления, методов, алгоритмов и информационных технологий поиска, хранения, обработки и анализа данных дистанционного зондирования земли; Разработка теоретических основ формирования высоконадежных многофункциональных GRID-систем, обеспечивающих децентрализованное отказоустойчивое хранение, распределенный доступ и оперативную обработку данных ДЗЗ; Создание ГРИД-сервисов хранения, обработки и визуализации данных ДЗЗ для мониторинга; Решение фундаментальных проблем обработки и анализа цифровых космических изображений в распределенной информационной системе; Методы, алгоритмы и информационные технологии, обеспечивающие функционирование интеллектуального банка данных дистанционного зондирования Земли.

Авторы статьи получили поддержку оригинального проекта «Распознавание природно-техногенных объектов по гиперспектральным аэрокосмическим изображениям» по Теме 19. в рамках фундаментальной проблемы «Создание информационных технологий обработки и интеллектуального анализа данных аэрокосмического дистанционного зондирования Земли и других планет».

Жесткая конкуренция разработчиков космических систем сверхвысокого пространственного разрешения (менее 1 м, но с малым числом спектральных каналов) приводит к особой востребованности информационной продукции обработки данных именно такого разрешения со стороны пользователей для целей создания инфраструктуры пространственных данных. При этом пакеты прикладных программ обработки данных гиперспектрального и многоспектрального зондирования (ERDAS, ENVI и др.), поставляемые зарубежными фирмами, содержат лишь некоторые стандартные процедуры классификации объектов по их аэрокосмическим изображениям. Возможности космических систем гиперспектрального зондирования (Нурегон, США; CHRIS/PROBA, Европейский Союз) до конца не ясны, как и создание вычислительных сред для развития возникающих новых приложений. Данные этих зарубежных систем не имеют открытого доступа, что повышает необходимость создания отечественного аппаратно-программного комплекса аэрокосмической гиперспектрометрии.

Наш проект направлен на фундаментальные междисциплинарные исследования в высокотехнологичной области аэрокосмического дистанционного зондирования Земли и объектов природно-техногенной сферы, объединяющие теоретическую и прикладную математику, теорию информатики и информационные технологии, физику взаимодействия излучения с веществом и молекулярную спектроскопию, науки о Земле и биосфере и нанотехнологии. Теоретические фундаментальные результаты и создаваемое информационно-математическое обеспечение апробируются на новейших отечественных разработках аппаратуры и средств для гиперспектральных аэрокосмических наблюдений. Это новое научное,

технологическое и техническое направление в развитии современного дистанционного зондирования с широкой сферой приложений в разных областях знаний.

Необходимость создания вычислительной инфраструктуры использования данных дистанционного зондирования выдвигает на передний план разработки, касающиеся повышения информативности и достоверности обрабатываемых данных. Составной частью таких разработок являются вычислительные процедуры распознавания природно-техногенных объектов по гиперспектральным аэрокосмическим изображениям (сотни спектральных каналов в видимой и ближней инфракрасной области, разрешение в единицы нанометра). В качестве инструментария решения этой фундаментальной задачи служат разработанные авторами ранее и предполагаемые для дальнейшего развития методы, алгоритмы и расчетные программы обработки данных гиперспектрального зондирования на основе решения прямых и обратных задач теории переноса излучения и новых подходов в теории информатики.

Создано оригинальное программно-алгоритмическое обеспечение обработки данных отечественной гиперспектральной аппаратуры. Проведена валидация (наземное подтверждение) получаемой информационной продукции обработки данных гиперспектрального аэрозондирования на основе летных испытаний разработанных типов аппаратуры. Показаны направления совершенствования имеющихся аппаратурных комплексов гиперспектрального зондирования с точки зрения выбора наиболее информативных каналов для решения региональных задач аэрокосмического мониторинга. Предлагается инновационный подход к решению прикладных задач распознавания природно-техногенных объектов. Новизна подхода – в том, что в нем решается задача оптимизации числа каналов гиперспектрального зондирования, обеспечивающих решение задачи распознавания наблюдаемых объектов с обоснованной точностью. Решение этой задачи основывается не на интуитивных представлениях о спектральных свойствах абстрактных объектов и тем более не на стандартных подходах к вычислению вегетационных индексах (тех или иных комбинациях каналов), а на строгих методах вычислительной математики и информационного обеспечения обработки гиперспектральных изображений. Большое разнообразие алгоритмов распознавания объектов увязывается в данном проекте с программным обеспечением современных компьютерных средств и перспективой использования высокопроизводительных суперкомпьютеров для решения рассматриваемых прикладных задач.

Работа поддержана РФФИ (проекты 12-01-00009, 11-07-12006\_офи\_м\_2011) и Программой фундаментальных исследований РАН (проект 3.5 ОМН).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Т.А. Сушкевич Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Отчет № О-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966.
2. Космическое землеведение: информационно-математические основы / Под ред. Садовниченко В.А. Авторы: Козодеров В.В., Косолапов В.С., Садовнический В.А., Тимошин О.А., Тищенко А.П., Ушакова Л.А., Ушаков С.А. М.: Изд-во МГУ, 1998. 571 с.
3. Космическое землеведение: Диалог природы и общества. Устойчивое развитие / Под ред. Садовниченко В.А. Авторы: Козодеров В.В., Садовнический В.А., Ушакова Л.А., Ушаков С.А. М.: Изд-во МГУ, 2000. 640 с.
4. В.В. Козодеров, Т.А. Сушкевич. Устойчивое развитие и рациональное природопользование: аэрокосмический мониторинг природно-техногенной сферы и информационно-динамические модели лценки ее состояния. / Материалы Международной конференции «Устойчивое развитие: природа - общество – человек», 5–6 июня 2006 года, Центр Международной Торговли, Москва. Организаторы: Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Торгово-промышленная палата Российской Федерации, ЗАО «ПИК «МАКСИМА». Секция: Природа-Общество-Человек в XXI веке: рациональное природопользование и экологическая безопасность. CD-ROM.
5. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, А.А. Иолтуховский Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М., Наука, 1990.
6. Т.А. Сушкевич Математические модели переноса излучения. М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005.