

ИНФОРМАЦИОННО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ГЛОБАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗА ПОСЛЕДСТВИЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова, В.В. Козодеров, Б.А. Фомин, А.Н. Андрианов, А.Н. Волкович, П.П. Григорьева, Е.В. Дмитриев, Л.Д. Краснокутская, В.А. Фалалеева, А.С. Кузьмичев, А.А. Николенко, П.В. Страхов, Б.М. Шурыгин

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

Немного истории

Настоящая статья посвящается памяти академика Валентина Васильевича Воеводина, которому в 2014 году исполнилось бы 80 лет (родился 22.03.1934, умер 27.01.2007, Москва). В.В.Воеводин – признанный ещё в СССР основоположник научного направления «параллельные алгоритмы и программы» для больших вычислительных систем параллельной архитектуры, который оказал существенное влияние на несколько поколений вычислителей и программистов. Представительный список его публикаций по этой тематике содержится на сайте <http://parallel.ru/russia/people/voevodin.html>. В 1980 году академик Г.И.Марчук переехал из Новосибирска в Москву в связи с назначением его Министром науки и Председателем ГКНТ СССР. Гурий Иванович, занимая разные административные должности, никогда не прекращал заниматься наукой и в Зале коллегии ГКНТ по четвергам вечерами собирались ученые и специалисты со всей страны на «семинары» по трем научным направлениям, на одном из которых обсуждались проблемы вычислительной математики и развития вычислительной техники. Активным участником семинара был В.В.Воеводин и именно там зародились идеи параллельных алгоритмов и вычислений. Так что не случайно в 1980 году В.В.Воеводин стал сотрудником Отдела вычислительной математики при АН СССР, организованного Г.И.Марчуком (Постановление Президиума АН СССР от 27 марта 1980 года № 343 о создании при Президиуме Отдела вычислительной математики на правах научно-исследовательского института). Ныне это Институт вычислительной математики РАН, в котором В.В.Воеводин проработал до последних дней своей жизни. А в 1981 году появилась первая публикация о проблемах распараллеливания вычислений [1]. И в том же 1981 году осенью на конференции в МГУ, приуроченной к 75-летию академика А.Н.Тихонова, В.В.Воеводин впервые выступил с докладом о параллельном алгоритме решения одной из задач алгебры. Этот доклад не только привлек внимание научной общественности своей новизной, но и своей убежденностью в перспективности этого направления В.В.Воеводин многих увлек заниматься распараллеливанием вычислений. Среди таких «увлеченных» оказалась и Т.А.Сушкевич, которая развивала и развивает свой подход к организации параллельных расчетов, основанный на «факторизации» и «расщеплении» математической и физической модели [2], поскольку многомерные кинетические уравнения Больцмана при численных решениях не сводится к алгебраическим системам. Напомню, что в эти годы в СССР были навязаны и повсеместно устанавливались ряд ЕС ЭВМ (IBM), которые тормозили развитие отечественной вычислительной техники и информационных технологий. В.В.Воеводин вовремя подал сигнал и дал шанс нашим ученым и специалистам с опережением заняться действительно перспективным направлением «параллелизм», которое вот уже более 20 лет является господствующим в IT-технологиях и «computer sciences» и продолжает активно развиваться, каждые два года меняя «платформы» и интерфейсы.

В 2014 году можно отметить несколько важных дат в истории компьютерного мира:

60 лет с введения в строй ПЕРВОЙ отечественной серийной ЭВМ «Стрела» (в 1954 году первый экземпляр «Стрелы» ввели в строй в ОПМ МИАН) [3]. С 1947 года в СССР работами по созданию ЭВМ руководил М.В.Келдыш и первая серийная ЭВМ «Стрела» - советская ЭВМ первого поколения – создана под его руководством. В 1954 году разработчики были удостоены Сталинской премии. Среди награжденных будущий академик Владимир Константинович Левин – ведущий конструктор современных суперкомпьютеров. Главному конструктору Юрию Яковлевичу Базилевскому было присвоено звание Героя Социалистического Труда.

50 лет назад в августе 1964 года была введена в строй ПЕРВАЯ отечественная полупроводниковая электронно-вычислительная машина (ЭВМ нового поколения) «Весна» общего назначения для решения «больших» стратегически важных задач с самой высокой по тем временам производительностью (до 300 тысяч операций-команд в секунду) [3] и с ПЕРВОЙ уникальной мультирежимной операционной системой, обеспечивающей многозадачный режим загрузки процессоров и параллельную работу нескольких устройств (когда во время испытаний одновременно запускали около десяти внешних устройств, в машинном зале было очень шумно). Идейными авторами и разработчиками операционной системы (ОС) для ЭВМ «Весна» являлись Михаил Романович Шура-Бура (21.10.1918 – 14.12.2008) и Всеволод Серафимович Штаркман (16.10.1931-21.02.2005), который осенью 1964 года защитил ПЕРВУЮ в СССР (кандидатскую) диссертацию по

1978 г. – НИИ «Квант» Минрадиопрома). Главный конструктор – В.С.Полин, заместитель - В.К.Левин, ныне академик и ведущий разработчик и конструктор современных суперкомпьютеров с высоким параллелизмом вычислений. Соисполнителем разработки являлся Институт Келдыша. Т.А.Сушкевич участвовала в математической сдаче ЭВМ.

50 лет назад в августе 1964 года на ЭВМ «Весна» были построены первые компьютерные (машинные) графики и был реализован первый компьютерный анимационный фильм [5] – визуализация на экране характерна процесса обтекания цилиндра разреженной плазмой с покaдровой фиксацией изображения путем фотосъемки на специальную пленку для последующей демонстрации с помощью проектора и размножения изображений путем печати снимков на бумажных носителях. Это был ПЕРВЫЙ в СССР результат графического интерфейса в интерактивном режиме. Его авторами являются Ю.М.Баяковский, который обеспечивал технологию машинной графики и визуализации, и Т.А.Сушкевич, которая проводила математический расчет [6-7] и формировала матрицы для изображения на экране характерна. Этот факт был признан Американской ассоциацией по компьютерной графике (ACM SIGGRAPH). В 1990 г. Ю.М.Баяковский был принят в члены Клуба Пионеров компьютерной графики ACM SIGGRAPH. Ю.М.Баяковский – первый среди русских получил диплом члена ACM/SIGGRAPH Pioneers CLUB.

60 лет назад, в середине февраля 1954 года, в кабинете академика Мстислава Всеволодовича Келдыша [8-9] состоялось ПЕРВОЕ совещание [10], на котором впервые обсуждался вопрос о создании и запуске в космическое пространство искусственного спутника Земли (ИСЗ). В совещании участвовали ученики М.В. Келдыша кандидаты физико-математических наук Тимур Магомедович Энеев и Дмитрий Евгеньевич Охочимский [10], ставшие академиками за достижения в космосе. Присутствовали С.П. Королев, П.Л. Капица, И.А. Кибель, М.К. Тихонравов, А.Ю. Ишлинский, С.Н. Вернов и целый ряд других людей. Это были те ученые, конструкторы и инженеры – ведущие профессионалы и специалисты, кто был непосредственно связан с созданием космической техники, и те, кто мог высказать предложения по научным исследованиям, которые нужно было бы проводить со спутников.

В 2014 году исполнилось 50 лет с момента публикации первой статьи Т.А.Сушкевич по теории переноса излучения [11]. После окончания МГУ и направления на работу в Институт Келдыша в начале 1963 года Тамаре Алексеевне доверили решение «большой» задачи на ЭВМ «Весна» по актуальному проекту покорения космического пространства, связанному с открытием в 1958 году радиационного поля Земли. А в итоге стала одним из ПЕРВЫХ специалистов по математическому моделированию, когда все этапы решения задачи выполнялись одним сотрудником и получилась «гремучая смесь» физика-математика-компьютер-космос. С тех пор вся научная деятельность Т.А.Сушкевич связана с информационно-математическим обеспечением космических проектов на всех поколениях ЭВМ от «Стрелы» в 1961 году до современных суперкомпьютеров.

Настоящее и будущее

Идеи «параллелизма», рожденные В.В.Воеводиным, и его убежденность в их перспективности уже более 30 лет привлекают много новых молодых исследователей в ряды специалистов по параллельным вычислениям и алгоритмам на суперкомпьютерах разной архитектуры для решения фундаментальных и прикладных задач в широком спектре приложений (вплоть до национальных платежных систем и киберразведки), потому так много соавторов статьи. Коллектив под руководством Т.А.Сушкевич с 1989 года, т.е. уже 25 лет, занимается проблемами разработки универсального информационно-математического обеспечения для решения широкого спектра прикладных задач, основанных на приложениях теории переноса излучения в рассеивающих, поглощающих, поляризующих и преломляющих изотропных и анизотропных естественно-природных и искусственных средах [2, 12-18].

На современном этапе появились новые прорывные проекты и вызовы. Речь идет о более интенсивном освоении Арктики и развитии инфраструктуры нефтегазовой отрасли на Севере и Дальнем Востоке, т.е. в трудно доступных регионах, когда не обойтись без аэрокосмических средств «землеобзора». Важнейшая особенность мониторинга и наблюдений из космоса в районе Арктики связана с чисто региональными проблемами: значительная часть года в этом районе «полярная ночь», когда нет возможности для использования средств и методов, развитых для видимого, солнечного, диапазона спектра длин волн и вынуждены развивать и использовать методы и средства для инфракрасного длинноволнового диапазона спектра. Вторая особенность связана с низкими температурами атмосферы и наличием «перистых облаков» высокого яруса со сложными микрофизическими структурами водяного пара в кристаллической фазе. Третья особенность обусловлена физическими свойствами и структурами пространственно неоднородной подстилающей поверхности, когда наряду с ледяными, снежными и водными поверхностями имеет место наличие разных типов смесей воды, льда и снега, да при этом возможны загрязнения разной природы. В целом это многомерная задача со сложной пространственно-угловой зависимостью коэффициентов отражения и экстинкции, т.е. собственного излучения, земной поверхности. Четвертая особенность – это сферическая многомерная геометрия задачи с огромными масштабами фазовой области, если принять во внимание радиус Земли.

Речь идет о перспективах информационно-математического обеспечения гиперспектральных и поляризационных подходов аэрокосмического дистанционного зондирования (ДЗЗ) для прогноза и мониторинга природных и техногенных катастроф в нефтегазовой отрасли, а также при расширении освоения региона Арктики. Развитие нефтегазовой отрасли связано, в частности, с негативными последствиями не только для

нефте и газодобычи, влияющие на глобальное альbedo и радиационный баланс Земли, но и разрушения биосферы и локального и регионального климата из-за таяния ледового покрытия и «вечной мерзлоты».

В 2013 году были отмечены исторические события в освоении космоса: 50-летие ПЕРВОГО научного эксперимента, проведенного космонавтами во время полета на пилотируемых космических кораблях, и это ПЕРВЫЙ научный эксперимент по ДЗЗ, который провели на «Восток-5» Валерий Федорович Быковский (14-19 июня 1963 г.) и «Восток-6» ПЕРВАЯ женщина-космонавт Валентина Владимировна Терешкова (16-19 июня 1963 г.), и ВПЕРВЫЕ ученые с участием космонавтов сделали ОТКРЫТИЕ, наблюдая из космоса : обнаружили аэрозольные слои в стратосфере, возникшие в результате мощного извержения вулкана Агунг в марте 1963 года (Гунунг Агунг – это гора-вулкан на острове Бали, Индонезия), и подтвердили гипотезу Юнга о существовании динамично изменяющегося «стратосферного аэрозольного слоя Юнга» с максимумом концентрации крупных частиц между 15 и 25 км; было положено начало инструментальным исследованиям Земли из космоса.

В Институте Келдыша Т.А.Сушкевич обеспечивала математическое моделирование этого эксперимента и участвовала в анализе и интерпретации космических данных. С позиции 50-летнего опыта исследований важным является провести анализ и обобщение результатов и достижений в методах решения прямых и обратных задач теории переноса излучения и средствах аэрокосмического дистанционного зондирования газового и аэрозольного состава атмосферы, а также природных и техногенных объектов и поверхности Земли в интересах прогноза и мониторинга природных и техногенных катастроф и негативного воздействия, обусловленных развитием нефтегазовой отрасли.

Это 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, супервычисления на суперкомпьютерах и массовый параллелизм с разработкой и внедрением ГРИД и «облачных» технологий, физику взаимодействия излучения с веществом и молекулярную спектроскопию, науки о Земле и биосфере и нанотехнологии, теорию и методы распознавания природно-техногенных объектов по гиперспектральным аэрокосмическим изображениям, в том числе с учетом поляризации излучения, и повышения информативности и достоверности обрабатываемых данных. Это новое научное, технологическое и техническое направление в развитии современного дистанционного зондирования с широкой сферой приложений в разных областях знаний.

Основная фундаментальная проблема связана с развитием нового направления в науке, разработкой методов и средств для экспертизы, прогнозирования и критериев оценки опасности процессов, обусловленных глобальными изменениями климата, биосферы, экологии и последствиями катастрофических явлений, замена натурных испытаний вычислительным экспериментом и имитационным моделированием. В перспективе **экологическая и технологическая безопасность** не только в масштабах России, но и всей планеты переходит в разряд стратегических и важнейших социально-экономических факторов, а математические модели уже стали и остаются перспективным эффективным инструментом исследований и решения научных и практических задач.

Радиационное поле, которое численно можно смоделировать как решение многомерных скалярных и векторных краевых задач для кинетических уравнений переноса излучения в рассеивающих, поглощающих, поляризующих, преломляющих гетерогенных средах (атмосфера, облака, океан, поверхность) в масштабах планеты, – один из неотъемлемых факторов жизнеобеспечения человека, животного и растительного мира на Земле, а также одна из определяющих компонент земной экосистемы и биосферы, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма (обратных связей, которые иногда приводят к взаимоусилению различных процессов). Поле излучения влияет на механизмы изменчивости (динамические процессы: циркуляция, конвекция, турбулентный перенос; радиационные процессы; фотохимические процессы) геофизического, метеорологического, климатического состояния Земли, которые обладают сложными нелинейными связями, затрудняющими предсказание возможных эффектов, оценку их величины и значимости. Это с одной стороны, а с другой стороны, при дистанционном зондировании природных объектов электромагнитное излучение Земли, которое регистрируется разными средствами, является носителем информации о состоянии окружающей среды.

Полный вектор Стокса характеристик поляризации излучения с гиперспектральным разрешением является наиболее полным носителем информации при дистанционном зондировании среды и объектов. Нюанс состоит в том, что исходные модели – краевые задачи для векторных кинетических уравнений переноса излучения с учетом поляризации – монохроматические, т.е. решение можно определять с любым высоким спектральным разрешением, которое зависит от спектрального разрешения константного обеспечения для описания рассеяния и поглощения поляризованного излучения, т.е. коэффициентов уравнения и граничных условий.

Всемирная система мониторинга и иерархия моделей – главные инструменты для прогнозирования изменений в природных процессах и разделения естественных и антропогенных воздействий. Особая роль отводится гиперспектральным и поляриметрическим системам дистанционного зондирования для нанодиагностики природных и техногенных сред.

Научная идея состоит в том, чтобы исследовать возможности использования существенных различий в спектральном ходе поглощения и пропускания основных компонент атмосферы и облаков и отражения земной

собственного излучения, информативных в отношении конкретных компонент, и на этой основе дискриминировать компоненты по их спектральным характеристикам.

Системы гиперспектрального аэрокосмического зондирования позволяют получать одновременно информацию об объектах атмосферы и на земной поверхности в сотнях спектральных каналов видимой и ближней инфракрасной области. При таком высоком спектральном разрешении (единицы нанометров) в регистрируемых данных содержится информация о тонкой структуре зондируемых объектов. Прежние технологии обработки многоспектральных снимков (до десятка спектральных каналов) уступают место новым технологиям обработки гиперкубов данных (две пространственные координаты и длина волны). Реальные информационные возможности новых технологий до конца не ясны, но первые результаты, полученные исполнителями проекта в рамках грантов РФФИ, показывают, что они должны и могут приводить к повышению информационного содержания регистрируемых данных.

В то же время требуется устранение возможной избыточности данных гиперспектрального зондирования вследствие корреляции отдельных каналов при таком высоком спектральном разрешении. Требуется оптимизация каналов при решении конкретных прикладных задач аэрокосмического мониторинга природно-техногенных объектов. Результаты выбора соответствующих наборов каналов, достаточных для решения тематических задач без существенного уменьшения точности распознавания объектов, увязываются с объемами обучающих выборок, характеризующих объекты исследований.

Космические условия накладывают дополнительные сложности для гиперспектральных и поляриметрических измерений, обусловленные естественным явлением делюции (расходимости пучка и потери энергетической яркости), требуется более тонкая атмосферная коррекция и т.д. Эти задачи предстоит решать. Тем более, что правительство объявило космические исследования приоритетным направлением.

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 перспективные большие задачи, решение которых требует разработки нанотехнологий для космических проектов, в частности, развитие гиперспектральных и поляриметрических 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 суперкомпьютерах с «параллелизмом». Для решения таких амбициозных задач создан научный потенциал мирового уровня. Предстоит большая работа.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 12-01-00009, № 14-01-00197) и Российской академией наук (проект 3.5. ПФИ ОМН РАН).

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.В. Воеводин "Некоторые машинные аспекты распараллеливания вычислений" // Препринт, 1981, №22, ВИНТИ, Москва, 10с. <http://parallel.ru/russia/people/voevodin.html>
2. Т.А. Сушкевич. Математические модели переноса излучения. М., БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005, 661с.
3. Э.С. Луховицкая, Г.Н. Езерова. "Информатика в ИПМ им. М.В. Келдыша. 1960-е годы" // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, 2013, №29, 33с. <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-29>.
4. В.С. Штаркман, кандидатская диссертация (секр.). Москва, ОПМ МИАН СССР, 1964.
5. Ю.М. Баяковский, В.А. Галактионов "О некоторых фундаментальных проблемах компьютерной (машинной) графики" // Информационные технологии и вычислительные системы, 2004, №4, с.3-24. <http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/articles/dep20/comgra.pdf>; http://www.keldysh.ru/kur/cgraph/IPM_keldisha_Ran_files/history.htm.
6. М.В. Масленников, Ю.С. Сигов, Т.А. Сушкевич "Численное решение задачи о стационарном обтекании тела разреженной плазмой" // Тезисы докладов. Четвертое совещание по магнитной гидродинамике, Рига, 22-27 июня 1964 г. Рига, Изд. АН Латв.ССР, 1964.
7. М.В. Масленников, Ю.С. Сигов "Дискретная модель вещества в задаче об обтекании тел разреженной плазмой" // ДАН СССР, 1964, т.159, №5, с.1013-1016.
8. М.В. Келдыш. Творческий портрет по воспоминаниям современников, М., Наука, 2001, 416 с.
9. Мстислав Всеволодович Келдыш. 100 лет со дня рождения / ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Составители: Г.Н. Езерова, Ю.П. Попов, М.А. Лукичев, Ярославль, ООО Изд-во РМП, 2011, 344с.
10. Прикладная небесная механика и управление движением / Сборник статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е. Охотимского. Составители: Т.М. Энеев, М.Ю. Овчинников, А.Р. Голиков, М., ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010, 368с.
11. М.В. Масленников, Т.А. Сушкевич "Асимптотические свойства решения характеристического уравнения

12. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова. О перспективах аэрокосмического гиперспектрального дистанционного зондирования для нанодигностики опасных явлений // Известия вузов, Физика, 2009, № 2/2, с.149-155.
13. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова и др. Информационно-математический аспект аэрокосмического гиперспектрального мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2009, вып.6, т.П, с.552-559.
14. Т.А. Сушкевич "Космические проекты: информационно-математический аспект и супервычисления (история и перспективы)" // Вестник Южно-Уральского государственного университета (серия Математическое моделирование и программирование), 2011, вып.8. №17(234), с.4-19.
15. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, В.В. Козодеров, С.В. Максакова, Б.А. Фомин, А.Н. Волкович, В.П. Шари, С.Д. Устюгов, А.К. Куликов. "Параллельные вычисления в задачах аэрокосмического дистанционного зондирования атмосферы и поверхности Земли методами поляриметрии" // Материалы Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: эксафлопсное будущее», Изд-во Московского Университета, 2011, с.206-209.
16. Т.А. Сушкевич, В.В. Козодеров, Т.В. Кондранин, С.А. Стрелков, Е.В. Дмитриев, С.В. Максакова "Параллельные вычисления в задачах космического экологического мониторинга и гиперспектрального дистанционного зондирования Земли" // Материалы Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений», Изд-во Московского Университета, 2012, с.320-324.
17. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова "Теоретические основы и расчетные модели для супервычислений в проблемах мониторинга экосистемы, биосферы и климата Земли, возникновения и развития аварий и природных катастроф на основе аэрокосмического дистанционного зондирования" // Материалы Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: все грани параллелизма», Изд-во Московского Университета, 2013, с.438-442.
18. Т.А. Сушкевич, С.А. Стрелков, С.В. Максакова "60 лет от первого совещания по ИСЗ до современных систем дистанционного зондирования и мониторинга Земли из космоса: информационно-математический аспект (история и перспективы)" // Оптика атмосферы и океана, 2014, т.27, №7, с.21-27.