

Всемирная глобальная научная Программа «Будущее Земли»: радиационное поле Земли, аэрокосмическое ДЗЗ, компьютеринг, big data (посвящается академику В.В.Воеводину в год его 85-летия)*

Т.А. Сушкевич¹, С.А. Стрелков¹, С.В. Максакова¹, В.В. Белов², А.В. Зимовая²,
В.В. Козодеров³, С.М. Пригарин⁴, В.А. Фалалеева⁵, Л.Д. Краснокутская⁵, Б.А. Фомин⁶,
Г.Э. Колокутин⁶, А.С. Кузьмичев⁷, А.А. Николенко⁷, П.В. Страхов⁷, Б.М. Шурыгин⁷

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, ²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, ³МГУ имени М.В. Ломоносова, ⁴Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, ⁵Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, ⁶Центральная аэрологическая обсерватория, ⁷Московский физико-технический институт

Посвящается памяти выдающегося математика академика Валентина Васильевича Воеводина (22.03.1934-27.01.2007) – основоположника параллельных вычислений в СССР с благодарностью за интеллектуальное сотрудничество. Глобальный вызов "Повестки XXI-го века" - это не имеющая аналогов по масштабам в истории цивилизации всемирная научная Программа "Будущее Земли" (Future Earth), созданная в 2015 году для координации международных исследований по устойчивому развитию окружающей среды и общества по совместной инициативе Международного совета по науке и Международного научного совета по общественным наукам при поддержке ЮНЕСКО, Программы Объединенных Наций по окружающей среде, Международного университета ООН и Международной метеорологической организации.

Ключевые слова: Будущее Земли, перенос излучения, радиационное поле Земли, радиационный форсинг, математическое моделирование, мониторинг, гиперспектральное дистанционное зондирование, климат, экология, супервычисления

1. Введение

Самая масштабная в истории цивилизации и важная для всего человечества глобальная Программа «Повестки XXI-го века» – это всемирная научная Программа «Будущее Земли» (Future Earth) [1], фундаментальные основы для реализации которой были заложены в XX-м веке благодаря изобретению компьютера и выхода человека в космос, и летом 2018 года к Программе присоединилась Россия в лице Российской академии наук [2]. Эти великие открытия – покорение атома и космоса и изобретение компьютера – базис научно-технической революции в середине XX-го века и международное сотрудничество в космосе связаны с именем математика-легенды Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911-24.06.1968) [3-6].

65 лет назад, 14 февраля 1954 года, в кабинете М.В. Келдыша (с 1981 года Мемориальный музей-кабинет академика М.В. Келдыша РАН) состоялось первое совещание [6], на котором впервые обсуждался вопрос о возможности создания и запуска в космическое пространство первого искусственного спутника Земли (ИСЗ). В совещании участвовали ученики М.В. Келдыша кандидаты физико-математических наук Тимур Магомедович Энеев и Дмитрий Евгеньевич Охоцимский [6], 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

* Исследование частично поддерживается грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 18-01-00609, 17-01-00220).

те, кто мог высказать предложения по научным исследованиям, которые нужно было бы проводить со спутников.

О программе космических исследований заговорили в 1955 году. По указанию М.В. Келдыша в 1955 году из Академии наук СССР с помощью референта Геннадия Андреевича Скуридина разослали письма в разные организации и ученым разных специальностей с одним вопросом «*Как можно использовать космос?*» Это было время энтузиастов и мечтателей. Мнений и предложений поступило много и разных. Для убеждения руководителей СССР в необходимости освоения космического пространства и запусков космических спутников и кораблей М.В. Келдыш как уже признанный государственный деятель выделил **две главные задачи: разведка и наблюдения Земли**, вокруг которых сформировались многие научно-исследовательские проекты, определилась новая отрасль человеческой деятельности, в 1955 году началось строительство космодрома «Байконур» и были созданы Министерство общего машиностроения и другие ведомства.

Подтверждается стратегический выбор, сделанный Главным Теоретиком Космонавтики, единственным математиком трижды Героем Социалистического Труда М.В. Келдышем в 1955 году и актуальный в XX и XXI веках. Юрий Алексеевич Гагарин (09.03.1934–27.03.1968) – первый в истории человечества увидел планету Земля из космоса и воскликнул «Земля голубая!», а позже добавил «Земля такая маленькая...».

По инициативе академика Виктора Антоновича Садовниченко, отметившего 3 апреля 2019 года свое 80-летие и который много сделал для создания и поддержки космических исследований в МГУ имени М.В. Ломоносова, начало формироваться новое научное и научно-практическое направление «Космическое земледелие» [7]. В 2019 году исполняется 130 лет уравнению переноса света, впервые сформулированного профессором О.Д. Хвольсоном [8-9], и 60 лет стажа работы руководителя коллектива Т.А. Сушкевич в области теории переноса излучения, начавшейся в 1959 году на кафедре математики (зав. кафедрой академик А.Н. Тихонов) на физическом факультете МГУ под руководством научного руководителя Е.С. Кузнецова [10] с изучения монографии Чандрасекара [11-12], и 55 лет выхода первой статьи по теории переноса излучения [13], а в монографии [14] содержится список около 400 научных публикаций.

В XX-м веке были заложены фундаментальные основы цивилизации и постиндустриального информационного общества XXI-го века, а также «цифровой экономики» и современных глобальных проблем по спасению планеты Земля. Сложнейшие проблемы эволюции, климата, экологии, глобального мониторинга и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с гиперспектральными подходами и нанодиагностики природной среды и объектов предлагается рассматривать как сопряженные. Пора от решения отдельных частных задач переходить к системам исследований глобальных процессов. Радиационное поле Земли – единое физическое поле (электромагнитное излучение) и объединяющий фактор таких динамических систем [15-22].

2. Кратко об истории параллельных вычислений

Настоящая статья посвящается памяти академика Валентина Васильевича Воеводина, которому в 2019 году исполнилось бы 85 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 [23].

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 имени Г.И.Марчука РАН, в котором В.В.Воеводин проработал до последних дней своей жизни. А в 1981 году появилась первая в СССР публикация о проблемах распараллеливания вычислений – это был препринт В.В.Воеводина [24], изданный ВИНТИ, имевшим права издавать и депонировать рукописи. 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. В.В.Воеводин издал книги, по которым учились многие [25-28].

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 [14, 29-32], поскольку многомерные кинетические уравнения Больцмана при численных решениях не сводятся к алгебраическим системам, а в приложениях к природным средам очень много разных факторов. 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 35 лет является господствующим в IT-технологиях и «computer sciences» и продолжает активно развиваться, каждые два года меняя «платформы» и интерфейс.

В 2019 году можно отметить несколько важных дат в истории компьютерного мира:

- 65 лет с введения в строй первой отечественной серийной ЭВМ «Стрела» (в 1954 году первый экземпляр «Стрелы» ввели в строй в ОПМ МИАН) [33]. С 1947 года в СССР работами по созданию ЭВМ руководил М.В.Келдыш и первая серийная ЭВМ «Стрела» - советская ЭВМ, ламповая, 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. В 1961 году Т.А.Сушкевич впервые начала писать программы на ЭВМ и это была «Стрела».

- 55 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) [33] 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 операционным системам [34]. ЭВМ разработали в Конструкторском бюро Госкомитета по радиоэлектронике (с 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 и создала первую большую программу на первую большую ЭВМ.

- 50 лет назад в августе 1964 года на ЭВМ «Весна» были построены первые компьютерные (машинные) графики и был реализован первый компьютерный анимационный фильм [35] – визуализация на экране характрона процесса обтекания цилиндра разреженной плазмой с кадровой 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 [35], и Т.А.Сушкевич, которая проводила математический

расчет [36, 37] и формировала матрицы для изображения на экране характрона. 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 советских специалистов получил диплом члена ACM/SIGGRAPH Pioneers CLUB.

После окончания физического факультета МГУ и направления на работу в Институт Келдыша в январе 1963 года Тамаре Алексеевне доверили решение «большой» задачи на ЭВМ «Весна» по актуальному проекту покорения космического пространства. Были открыты радиационные пояса и ионосфера Земли, которые представляли собой низкотемпературную плазму. Нужно было изучать процессы прохождения ракет и спутников через плазму, связанные с защитой космических аппаратов и космической связью. На «Весне» впервые был реализован мультипрограммный режим, позволяющий проводить обработку расчетных данных параллельно с расчетами. В 1966 году в «Институте Келдыша» начала свою эпохальную историю ЭВМ БЭСМ-6 с четырьмя кубами оперативной памяти, на которой кроме мультипрограммного режима, как на «Весне», появилась новая возможность распараллеливания, когда параллельно с расчетом выполнялись обмены с внешней памятью, т.е. с магнитными лентами (МЛ) и магнитными дисками (МД). Для расчета одного варианта радиационного поля в масштабах всей Земли требовалось около 300 часов процессорного времени, 6 МД, 14 МЛ. Распараллеливание расчетов и обменов было реализовано столь эффективно, что затраченное процессорное время почти совпадало с реальным физическим временем, т.е. расчет проводился без простоев и потерь.

С тех пор вся научная деятельность Т.А.Сушкевич (физик-теоретик после окончания кафедры «математика» на физическом факультете МГУ) связана с информационно-математическим обеспечением космических проектов на всех поколениях ЭВМ от «Стрелы» в 1961 году до современных суперкомпьютеров. 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.

3. Настоящее и будущее параллельных вычислений

Идеи «параллелизма», рожденные В.В.Воеводиным, и его убежденность в их перспективности уже более 38 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, потому так много соавторов статьи. Коллектив под руководством Т.А.Сушкевич с 1989 года, когда в «Институте Келдыша» появилась первая многопроцессорная вычислительная система МВС-100, занимается проблемами разработки универсального информационно-математического обеспечения для решения широкого спектра прикладных задач, основанных на приложениях теории переноса излучения в рассеивающих, поглощающих, поляризирующих и преломляющих изотропных и анизотропных естественно-природных и искусственных средах [12-22, 29-32].

При дистанционном зондировании и мониторинге технических объектов и окружающей среды носителем информации об их состоянии является электромагнитное излучение, регистрируемое различными средствами. Представляют актуальность перспективные гиперспектральные системы нанодиагностики природной и техногенной среды на основе данных аэрокосмического дистанционного зондирования атмосферы и земной поверхности (окружающей среды и объектов техносферы). Для решения таких проблем требуется информационно-математическое обеспечение, включающее прямые и обратные задачи теории переноса излучения. Даже на современных высокопроизводительных вычислительных системах стоят проблемы скорости вычислений и оптимальной организации параллельных расчетов при больших размерностях разностной сетки, а также передачи больших массивов результатов расчета по сетям от суперкомпьютера к рабочей станции оператора для последующей обработки.

С позиции 60-летнего опыта работы в области теории переноса излучения и её приложений, 58-летнего опыта работы на ЭВМ и компьютерах всех поколений, включая 30-летний опыт общения с многопроцессорными вычислительными системами, кластерами, суперкомпьютерами, и обобщения мирового опыта подтверждается наша убежденность в правильности избранного подхода к решению масштабных задач математического моделирования радиаци-

онного поля Земли: «сценарный» расчет с «декомпозицией» фазового объема [29-32] и методическим распараллеливанием.

Для разных приложений приходится иметь дело с двумя типами задач. Первый тип – это «большие» многомерные задачи расчета радиационного поля в масштабах планеты, требующие и больших ресурсов и больших затрат компьютерного времени. Второй тип – это «мелкие» задачи, обычно одномерные по пространству. Второй тип задач используется для массового экспресс-анализа и предварительных реперных оценок влияния и значимости отдельных факторов на радиационное поле Земли, чаще всего, приближенными численными методами [14] или методами статистического моделирования, в том числе Монте-Карло [38-39].

О масштабе гиперспектрального подхода даже для «мелких» задач свидетельствует спектральная структура семи основных газовых составляющих атмосферы. В Таблице представлены данные о числе спектральных линий поглощающих газов в наиболее полных и достоверных трех версиях базы HITRAN [40] за 2008, 2012 и 2016 годы. К формированию этих баз привлекаются ученые из разных стран [41]. Анализом, «эталонными расчетами» и приложениями этих баз к расчетам занимаются и члены нашего коллектива [42-46]. По данным 2016 года уже известны около 2 млн линий поглощения и это без учета континуального поглощения воды в разных фазах (водяной пар, капли, ледяные кристаллы) и аэрозолей разного происхождения. Для расчета коэффициентов поглощения необходимы профили метеорологических данных (температуры, давления) и концентраций компонент. И, естественно, важны время суток, времена года, регионы и т.д. При этом непрерывно меняется и никогда не повторяется атмосфера – это динамическая система с непредсказуемым состоянием. И, конечно, нужно учитывать многообразие подстилающих поверхностей и влияние океанов и облаков. Как следствие, для расчетов нужна библиотека математических моделей и методов в зависимости от «оптической погоды».

Таблица. Газы, количество линий для каждого газа в базах HITRAN-2008, HITRAN-2012 и HITRAN-2016

№	Молекула	База	Сумма линий по всем изотопам
1	H ₂ O	HITRAN-2008	69201
		HITRAN-2012	224515
		HITRAN-2016	313787
2	CO ₂	HITRAN-2008	314919
		HITRAN-2012	471847
		HITRAN-2016	559874
3	O ₃	HITRAN-2008	409686
		HITRAN-2012	422116
		HITRAN-2016	449570
4	N ₂ O	HITRAN-2008	47843
		HITRAN-2012	47843
		HITRAN-2016	160287
5	CO	HITRAN-2008	4477
		HITRAN-2012	4606
		HITRAN-2016	5381
6	CH ₄	HITRAN-2008	290091
		HITRAN-2012	468013
		HITRAN-2016	450332
7	O ₂	HITRAN-2008	6428
		HITRAN-2012	13975
		HITRAN-2016	14085
	всего	HITRAN-2008	1142645
		HITRAN-2012	1652915
		HITRAN-2016	1953316

4. О супервычислениях и параллельных алгоритмах

Цель разработки обеспечить максимально возможную переносимость комплекса программ, который развивается по мере появления новых суперкомпьютеров со своими архитектурами, и обеспечить прозрачную работу в распределенной сетевой среде. Комплекс должен без значительных переделок работать на кластере рабочих станций и массиве параллельных процессоров. Параллелизм реализуется в системе массовых расчетов большого набора краевых задач теории переноса излучения в широком диапазоне спектра длин волн с высоким разрешением для наборов «оптической погоды», типов подстилающей поверхности, источников излучения.

Используются следующие приемы распараллеливания вычислений:

- 1) распределенные вычисления по физическим моделям:
 - многоспектральные, в том числе гиперспектральные (по длине волны);
 - 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 (декомпозиция фазового объема задачи);
 - по параметрам функций влияния;
 - по компонентам векторов функций влияния;
 - по параметрам пространственно-частотных характеристик;
 - по компонентам векторов 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.

Основные составные части математического обеспечения:

- банки данных по оптико-метеорологическим моделям атмосферы и земной поверхности;
- система автоматизированного расчета спектро-энергетических и других радиационных характеристик атмосферы и Земли в различных диапазонах спектра от УФ до ММВ;
- банки данных радиационных характеристик (функции влияния локальных возмущений параметров или источников в атмосфере, дымах, облаках, гидрометеорах, океане и на земной поверхности, пространственно-угловые и спектральные распределения яркости системы Земля-атмосфера, функции пропускания и сферическое альbedo атмосферы и т.д.);
- пакеты программ обработки, визуализации и диагностики результатов численного эксперимента и аэрокосмических данных.

Библиотека программ численного решения краевых задач теории переноса излучения в рассеивающих, поглощающих и излучающих средах (атмосфера, океан, облачность, дымы, гидрометеоры, водные бассейны) составляется из набора программ на Fortran, каждая из которых позволяет рассчитывать радиационные характеристики при заданных модели и методике (краевая задача теории переноса, геометрия, численный метод и т.д.) в определенном диапазоне длин волн.

С учетом источников и процессов трансформации излучения выделяются четыре основные физико-математические модели, отвечающие спектральным диапазонам:

- оптический диапазон (источник - Солнце, многократное рассеяние);
- ближний ИК-диапазон (источники - Солнце и собственное излучение, многократное рассеяние);
- ИК-диапазон (источники – собственное излучение, без многократного рассеяния, сложная структура спектров поглощения, и солнечное излучение, многократное рассеяние в гидрометеорах и облаках, сложные спектры поглощения, анизотропные среды);
- ММВ диапазон (источник - собственное радиоизлучение, многократное рассеяние в гидрометеорах и облаках, сложные спектры поглощения).

Каждая из моделей описывается совокупностью оптико-метеорологических (геофизических) характеристик атмосферы, облаков, подстилающей поверхности, которые являются входными физическими данными для уравнения переноса (через коэффициенты, граничные условия, источники). Степень близости расчетных полей яркости к реальным определяется, с одной стороны, адекватностью входных параметров фактическим, с другой стороны, математической идеализацией процесса переноса излучения, реализованной в модели, методе, расчетном алгоритме.

5. Заключение

В 2019 году отмечается 60-летие первых в истории человечества полетов к Луне трех советских автоматических межпланетных станций: 02.01.1959 - «Луна-1», 14.09.1959 - «Луна-2», 04.10.1959 - «Луна-3» [6]. Это был прорыв в вечность! В XXI веке уже несколько стран ведут активные работы по «Лунным программам». Есть планы и у России. Будем надеяться, что Программа «Будущее Земли» и «Лунные Программы», а также проекты обеспечения безопасности страны и планеты стимулируют создание новых суперкомпьютеров и серверов для хранения big data и получение новых достижений в развитии и применении теории переноса излучения. В 2004 году создана Ассоциация более 40 стран для глобального мониторинга Земли. К сожалению, по всем международным программам из-за санкций сдерживается сотрудничество.

Литература

1. Future Earth. Global Research Projects. <http://futureearth.org> (дата обращения: 25.03.2019)
2. Постановление Президиума РАН № 103 от 29.05.2018 О создании Комитета РАН по международной программе "Будущее Земли". <http://www.ras.ru/presidium/documents/directions.aspx?ID=de903350-994f-4474-ad66-3a6c0db3dd44> (дата обращения: 25.03.2019).
3. Сушкевич Т.А. Главный Теоретик М.В. Келдыш и Главный Конструктор космонавтики С.П. Королев – покорители космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 9–25.
4. Сушкевич Т.А. М.В. Келдыш организатор международного сотрудничества в космосе и первой советско-американской Программы «Союз-Аполлон» (ЭПАС) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 9–22.
5. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. 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.
6. Прикладная небесная механика и управление движением. Сб. статей, посвященный Д.Е.Охочимскому / Сост.: Т.М.Энеев, М.Ю.Овчинников, А.Р.Голиков // Труды ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. 368 с.
7. 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.
8. Иванов В.В. Столетие интегрального уравнения переноса излучения // Труды астрономической обсерватории. Т. XLIV. Ученые записки Санкт-Петербургского Университета № 428. Серия математических наук. Вып. 66. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. 254 с.
9. Иванов В.В. Столетие интегрального уравнения переноса излучения // Рассеяние и поглощение света в природных и искусственных дисперсных средах. Ред. А.П. Иванов. Минск: Институт физики им. Б.И. Степанова АН БССР, 1991. С. 10-36.
10. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды (в связи со 100-летием со дня рождения) / Отв. редактор и составитель Сушкевич Т.А. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.
11. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии / Пер. с англ. издания Oxford, 1950, под ред. Е.С. Кузнецова. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с.

12. Сушкевич Т.А. Нобелевский лауреат С. Чандрасекар: к 65-летию первой монографии по переносу лучистой энергии (Посвящается 65-летию ИПМ имени М.В. Келдыша и памяти профессора Е.С. Кузнецова, основателя отечественной научной школы и создателя отдела «Кинетические уравнения») // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 228. 32 с.
13. Масленников М.В., Сушкевич Т.А. Асимптотические свойства решения характеристического уравнения теории переноса излучения в сильно поглощающих средах // ЖВМ и МФ. 1964. Т. 4, № 1. С. 23-34.
14. Сушкевич Т.А. Математические модели переноса излучения. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
15. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. On the conjugate problems of ecology, climate, evolution and remote sensing of the Earth // Proceedings SPIE V. 10833, <https://doi.org/10.1117/12.2506205> (дата обращения: 25.03.2019)
16. Sushkevich T.A. Threats of the Agung volcano and the 55th anniversary of the opening of stratospheric aerosol layers by space Earth remote sensing // Proceedings SPIE V. 10833, <https://doi.org/10.1117/12.2502487> (дата обращения: 25.03.2019)
17. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. On the spectral albedo of the Earth as an indicator of the evolution of the climate and the planet // Proceedings SPIE V. 10833, <https://doi.org/10.1117/12.2503876> (дата обращения: 25.03.2019)
18. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Земля, космос и суперкомпьютинг: сопряженные радиационные задачи (Посвящается 65-летию ИПМ им. М.В.Келдыша и памяти математика-легенды М.В.Келдыша) // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. №167. 20с.
19. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Альbedo планеты как индикатор эволюции климата Земли (65-летию ИПМ имени М.В.Келдыша и достижениям «Лунной программы» посвящается) // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2018. № 88. 28 с.
20. Сушкевич Т.А. К 55-летию открытия стратосферных аэрозольных слоев из космоса: вулканы и проблемы климата (Посвящается 65-летию ИПМ им. М.В.Келдыша и его достижениям в пилотируемой космонавтике) // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 125. 32 с.
21. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Космос, Земля и суперкомпьютинг: сопряженные задачи экологии, климата, мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектральный подход и нанодиагностика природных сред (посвящается 65-летию ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2018. Т. 7, № 4. С. 5-29.
22. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. и др. Теория переноса излучения и суперкомпьютинг: сопряженные задачи экологии, климата, мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектральный подход и нанодиагностика природных сред (посвящается 65-летию ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (24-25 сентября 2018 г., г. Москва). М.: Изд-во МГУ, 2018. С. 807-817. <http://russianscdays.org/files/pdf18/807.pdf>
23. Воеводин Валентин Васильевич. <http://parallel.ru/russia/people/voevodin.html> (дата обращения: 25.03.2019)
24. Воеводин В.В. Некоторые машинные аспекты распараллеливания вычислений // Препринт. 1981. № 22, ВИНТИ, Москва, 10 с.
25. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах. М.: Наука, 1986. 296 с.
26. Воеводин В.В. Параллельные структуры алгоритмов и программ. М.: ОВМ АН СССР, 1987. 148 с.
27. Воеводин В.В. Математические основы параллельных вычислений. М.: Изд-во МГУ, 1991. 345 с.
28. Воеводин В.В., Воеводин Вл. Параллельные вычисления. БХВ-Петербург, 2002. 608 с.

29. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Matrix approach to model of polarized radiation transfer in heterogeneous systems. Matrix methods: theory, algorithms, applications. London: World Scientific Publishing UK Ltd, 2008. P. 558-579.
30. Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V. Daylight background radiation modeling for the system of ocean-atmosphere with multi-layer clouds // International Journal of Remote Sensing. 2008. V. 29. Issue 21 november 2008. P. 6175-6180.
31. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Декомпозиция гетерогенной среды методом функций влияния векторной краевой задачи теории переноса излучения // Труды Девятой Всероссийской конференции «Сеточные методы для краевых задач и приложения», Казань, с 17 по 22 сентября 2012 года. Казань: Изд-во Казанского университета, 2012. 8 с.
32. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Максакова С.В. Многосеточные и ускоряющие процедуры для решения многомерной сферической задачи переноса излучения (к 50-летию первой сферической модели) // Материалы Одиннадцатой Международной конференции "Сеточные методы для краевых задач и приложения", 20-25 октября 2016, Казань. Казань: Казанский университет, 2016. С. 254-265.
33. Луховицкая Э.С., Езерова Г.Н. Информатика в ИПМ им. М.В. Келдыша. 1960-е годы // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 29. 33 с.
34. Штаркман В.С., кандидатская диссертация (секр.). Москва, ОПМ МИАН СССР, 1964.
35. Баяковский Ю.М., Галактионов В.А. О некоторых фундаментальных проблемах компьютерной (машинной) графики // Информационные технологии и вычислительные системы. 2004. № 4. С. 3-24.
36. Масленников М.В., Сигов Ю.С., Сушкевич Т.А. 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.
37. Масленников М.В., Сигов Ю.С. Дискретная модель вещества в задаче об обтекании тел разреженной плазмой // ДАН СССР. 1964. Т. 159, №5. С. 1013-1016.
38. Марченко М.А., Сушкевич Т.А. О параллельном моделировании кинетических процессов методом Монте-Карло (посвящается памяти Главного Теоретика Космонавтики М.В. Келдыша в год 60-летия запуска первого ИСЗ) // Вычислительные методы и программирование. 2017. Т. 18. Вып. 4. С. 434-446.
39. Марченко М.А., Сушкевич Т.А. О параллельном моделировании кинетических процессов методом Монте-Карло (посвящается памяти Главного Теоретика Космонавтики М.В. Келдыша в год 60-летия запуска первого ИСЗ) // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции, 25-26 сентября 2017 г., Москва. М.: Изд-во: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2017. С. 628-640.
40. The HITRAN Database. URL: <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/> (дата обращения: 25.03.2019)
41. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C. et al. The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. V. 203. P. 3-69.
42. Фомин Б.А., Фалалеева В.А. Прогресс в атмосферной спектроскопии и «эталонные» расчеты для тестирования радиационных блоков климатических моделей. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 08. С. 803-806.
43. Колокутин Г. Э., Фомин Б. А. Новые спектроскопические базы и дистанционное зондирование Земли методами инфракрасной спектроскопии высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 278-287.
44. Фалалеева В.А., Фомин Б.А. Спектроскопические проблемы в прямых задачах спутникового зондирования атмосферы и пути их преодоления. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 09. С. 733-738.
45. Сушкевич Т.А., Фомин Б.А., Колокутин Г.Э. Спектроскопическая база HITRAN-2016 и дистанционное зондирование атмосфер планет методами ИК-спектроскопии высокого разрешения // Сборник тезисов докладов Шестнадцатой Всероссийской конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", ИКИ РАН, Москва. DOI: 10.21046/2070-16DZZconf-2018a.
46. Фомин Б.А., Колокутин Г.Э. Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной

спектрометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 17-24.