

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Федотовой Екатерины Алфеевны «Численное моделирование нагрева атмосферы Земли солнечным и тепловым излучением», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Е.А. Федотовой посвящена методам расчёта нагрева/выхолаживания атмосферы Земли солнечным и собственным (тепловым) излучением в моделях общей циркуляции атмосферы (МОЦА). Главной целью диссертационной работы являлась разработка алгоритмов и программ для увеличения быстродействия радиационных блоков (РБ) МОЦА с помощью «быстрых» параллельных вычислений на графических процессорах.

Актуальность диссертационной работы обусловлена тем, что проблему РБ для МОЦА нельзя считать закрытой. Во-первых, считается что РБ всё ещё недостаточно быстрые. Также остаются вопросы к точности РБ. Это ясно показывают взаимосравнения тестовых расчётов потоков радиации, выполненных различными радиационными моделями- разработанными как у нас в стране, так и за рубежом. Например, оказалось, что различия в рассчитанных потоках, выполненных даже для фиксированных условий чистой атмосферы, зачастую превышают изменения в потоках при удвоении концентрации углекислого газа в атмосфере. Одной из основных трудностей является необходимость учёта в радиационных моделях сотен тысяч (и даже миллионов) спектральных линий молекул оптически активных газов атмосферы: H_2O , CO_2 , CH_4 , O_3 и др. Существуют радиационные модели двух типов: «эталонные» LBL (“line-by-line”) и «быстрые». В первых, для строгого учёта молекулярных спектров при расчёте интегральных потоков солнечной и тепловой радиации, решаются сотни тысяч уравнений переноса. Поэтому они относительно медленные и применяются в основном для проверки «быстрых» моделей в качестве эталонных. В «быстрых» моделях второго типа, применяющихся в РБ, всегда используются параметризации молекулярных спектров, позволяющие свести число решений уравнений переноса всего к нескольким сотням и даже десяткам. Подавляющая часть параметризаций основана на замене реальных спектров так называемыми «К-распределениями» (КР).

Вообще говоря, над решением проблемы РБ, трудились сотни специалистов на протяжении нескольких десятилетий. Поэтому для понимания вклада данной работы в решение проблемы РБ полезен краткий исторический обзор. Прежде всего следует отметить, что КР были предложены В.А. Амбарцумяном ещё в тридцатые годы предыдущего столетия. А в качестве метода получения КР в основном используется метод «К-корреляций» (КК) Лациса и Ойнаса (1990г.). Бали разработаны десятки моделей, основанных на КР и полученными методом КК. Отметим наиболее популярную ныне

RRTM-G модель, представленную в WIKIPEDIA (США, 2005 г.). В ней уравнения переноса решаются 112 и 140 раз для расчёта интегральных потоков солнечной и тепловой радиации, соответственно. Предложенная в диссертационной работе параметризация, полученная оригинальным методом (не КК), требует решения уравнений переноса 318 и 280 раз. Но в данной работе параметризации впервые реализована на графических процессорах, ускоряющих вычисления в сотни раз, что интересно и является несомненным вкладом в решении проблемы РБ. Также интерес представляет реализация на графических процессорах разработанной автором LBL модели.

Оценка содержания работы и ее завершенности. Диссертация содержит 132 страницы текста, включая 24 рисунка, и состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 106 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, отмечена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, сформулированы четыре основных результата, которые выносятся на защиту, а также кратко изложено содержание работы.

В главе I изложены методики расчета в нижней и средней атмосфере Земли поля собственного излучения атмосферы в ИК-диапазоне и поля солнечного излучения в частотном диапазоне от 2000 до 50000 см^{-1} с высоким спектральным разрешением в приближении горизонтально однородной атмосферы с учетом континуального поглощения молекул водяного пара и углекислого газа. В этой главе представлен алгоритм расчета коэффициента молекулярного поглощения с использованием параллельных вычислений на графических процессорах. Также в этой главе изложен специальный вариант метода дискретных ординат, в котором для численного решения системы линейных алгебраических уравнений относительно интенсивностей излучения в узлах сетки по оптической толщине и зенитному углу используется вариант метода Жордана-Гаусса, позволяющий эффективно использовать параллельные вычисления на графических процессорах. Созданы два комплекса программ, один из которых предназначен для расчетов с высоким разрешением по частоте в приближении горизонтально однородной атмосферы с учетом континуального поглощения молекул водяного пара и углекислого газа поля собственного излучения в атмосфере Земли в ИК-диапазоне от 10 до 10000 см^{-1} , а другой предназначен для расчетов поля солнечного излучения в атмосфере Земли в частотном диапазоне от 2000 до 50000 см^{-1} . Оба комплекса программ используют параллельные вычисления на графических процессорах и позволяют проводить большой объем вычислений.

В главе II изложены результаты расчетов с высоким спектральным разрешением поля собственного излучения в нижней и средней атмосфере Земли в интервале высот от поверхности Земли до 70 км в ИК-диапазоне в случае отсутствия облаков, а также при наличии в тропосфере облачных слоев большой оптической толщины. Разрешение по частоте составляло 0,001 см^{-1} , а по зенитному углу 9 градусов. Эти результаты расчетов

показали, что облачные слои большой оптической толщины существенно влияют на поле собственного излучения атмосферы в интервале частот от 10 до 3000 см^{-1} и существенно меняют общий энергетический баланс атмосферы по сравнению со случаем отсутствия облачных слоев.

Также в этой главе описан способ построения параметризаций молекулярного поглощения, предназначенных для расчетов поля собственного излучения, который учитывает различия газового состава в средней и нижней атмосфере и обеспечивает хорошую точность расчетов как в безоблачной атмосфере, так и при наличии облачных слоев с большой оптической толщиной. Этот способ относительно прост в программной реализации и позволяет менять число модельных каналов параметризации в широких пределах. Кроме того, представлена построенная с помощью этого способа параметризация оптических характеристик атмосферы Земли в частотном интервале от 10 до 2000 см^{-1} в интервале высот от поверхности Земли до высоты 70 км, содержащая 280 модельных каналов. Показано, что потоки восходящего и нисходящего излучения, рассчитанные с использованием этой параметризации, совпадают с этими же потоками, полученными с помощью расчетов с высоким спектральным разрешением, с относительной погрешностью меньше 1%. Отклонение между скоростью нагрева-охлаждения, рассчитанной с использованием этой параметризации, и этой же скоростью нагрева-охлаждения, рассчитанной с помощью расчетов с высоким спектральным разрешением, не превышает 0,2 К/сутки вне облачных слоев и 0,4 К/сутки внутри облачных слоев с большой оптической толщиной.

В главе III изложены результаты расчетов с высоким спектральным разрешением поля солнечного излучения в атмосфере Земли в частотном интервале от 2000 до 50000 см^{-1} в интервале высот от поверхности Земли до высоты 70 км на средних широтах в случае отсутствия облаков, а также при наличии облачных слоев большой оптической толщины. Разрешение по частоте составляло $0,001\text{ см}^{-1}$, а по зенитному углу 9 градусов. Кроме того, представлена построенная с помощью этого способа параметризация оптических характеристик атмосферы Земли в интервале высот от поверхности Земли до высоты 70 км, содержащая 318 модельных каналов. Показано, что потоки восходящего и нисходящего солнечного излучения, рассчитанные с использованием этой параметризации, совпадают с этими же потоками, полученными с помощью расчетов с высоким спектральным разрешением, с относительной погрешностью меньше 1%. Отклонение между скоростью нагрева, рассчитанной с использованием этой параметризации, и этой же скоростью нагрева, рассчитанной с помощью расчетов с высоким спектральным разрешением, вне и внутри облачного слоя меньше 1%, а наибольшее отклонение между этими скоростями достигается в интервалах частот от 2000 до 4000 см^{-1} и составляет 0.5 К/сут вне облачных слоев и 0.7 К/сут внутри облачных слоев.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертационной работы и результаты, которые выносятся на защиту.

Отмечу некоторые недостатки.

1. Название не совсем удачное. Тепловое излучение в основном охлаждает атмосферу.
2. Спектральное разрешение в расчётах обусловлено доплеровской шириной спектральных линий в верхней части атмосферы, которое пропорционально частоте центра линии. Поэтому в расчётах солнечной радиации можно использовать на порядок более грубую частотную сетку, чем в тепловой области.
3. Стр. 24. «вклад каждой линии поглощения... необходимо вычислять в 50000 узлах сетки по частоте.» Это не совсем так. Существуют «многосеточные» алгоритмы в которых вклад линии вычисляется всего в сотне узлов.

Но отмеченные недостатки не существенно влияют на качество работы

Содержание диссертации достаточно полно отражено в опубликованных работах. В ней представлен ряд новых важных научных результатов в области моделирования переноса излучения в атмосфере Земли, которые имеют большую практическую ценность и открывают новые возможности для моделирования общей циркуляции атмосферы Земли. Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация Е.А. Федотовой удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.2.2. — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а автор заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

26.01.2023 г.

Официальный оппонент
доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
ФГБУ Центральной Аэрологической Обсерватории
141701, г. Долгопрудный, Московской области,
ул. Первомайская, д. 3.

Б.А. Фомин

Подпись Б.А. Фомина подтверждаю:
Ученый секретарь
Центральной Аэрологической Обсерватории,
кандидат географических наук



Н.А. Безрукова