

ОТЗЫВ

**официального оппонента к.ф.-м.н. Шилькова Александра Викторовича
на диссертацию Федотовой Екатерины Алфеевны
«Численное моделирование нагрева атмосферы Земли
солнечным и тепловым излучением»,
представленной 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 численному моделированию переноса, рассеяния и поглощения излучения Солнца и собственного теплового (инфракрасного) излучения Земли в атмосфере. Главная цель диссертационной работы заключается в разработке радиационного блока для моделей общей циркуляции атмосферы Земли, предназначенного для экономичного расчета полей излучений. Радиационный блок должен: (а) обладать высокой точностью расчета скоростей поглощения и испускания энергии, переносимой обоими излучениями до высот порядка 70 км, (б) учитывать рассеяние излучений на макроскопических частицах облаков и аэрозолей, (в) использовать параллельные вычисления на графических процессорах для обеспечения высокого быстродействия расчетов, выполняемых на современных компьютерных комплексах. Эффективность радиационного блока по критерию точность-экономичность достигается использованием разрабатываемого диссертантом метода осреднения спектра излучений, который он называет параметризацией спектра. Сопутствующая цель работы – создание методики и комплекса программных средств для тестирования эффективности дальнейших разработок радиационного блока.

Актуальность темы диссертации обусловлена востребованностью современных радиационных блоков для корректного моделирования энергобаланса в моделях циркуляции нижней и средней атмосферы Земли (планет), в моделях регионального климата, а также для моделирования радиационных химических процессов в средней атмосфере. Существующие радиационные блоки обычно обеспечивают достаточную точность расчета только в безоблачной атмосфере на высотах до 25 км вследствие того, что в них (а) используется грубое двухпотокное приближение для углового

распределения излучения и (б) используются оптические параметризации, построенные по сечениям поглощения и концентрациям атмосферных газов, характерных для зонально осредненной нижней атмосферы. В средней атмосфере (высоты от 20 до 50 км) или в моделях высокого (регионального) разрешения точность указанных методик существенно падает, т.к. с ростом высоты или смещением вглубь континента снижается вклад основного поглотителя нижней атмосферы – молекул водяного пара и/или возрастает вклад молекул озона.

Достижение этих целей потребовало от Федотовой Е.А. во-первых, разработать метод осреднения-параметризации спектра коэффициентов молекулярного поглощения/испускания и спектра самого излучения в инфракрасном и видимом диапазоне. В качестве исходных данных использовался банк спектроскопических параметров линий молекулярного поглощения HITRAN. Во-вторых, реализовать экономичную методику расчета полей многократно рассеянного излучения в облаках. В третьих, для выяснения погрешности осреднения-параметризации создать независимый комплекс программ для выполнения реперных поточечных (Line-by-line) расчетов переноса атмосферной радиации в диапазоне волновых чисел от 10 до 50000 см^{-1} с высоким разрешением, достигающим 0.001 см^{-1} . Перечисленные задачи были решены автором в ходе работы над диссертацией.

Общая характеристика работы. Текст диссертации, содержащий 132 страницы, состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы более 106 наименований.

Введение содержит описание трудностей, возникающих в численном моделировании переноса атмосферной радиации, современных подходов в решении проблем, обоснование актуальности темы диссертационной работы. Здесь же сформулированы цели работы, основные результаты, которые выносятся на защиту, отмечается их практическая ценность и научная новизна.

В первой главе изложены численные методики расчета пространственно-угловых распределений теплового и солнечного излучений в атмосферах планет, которые далее диссертант использует как для выполнения реперных поточечных расчетов с высоким разрешением (до 0.001 см^{-1}), так и экономичных расчетов с использованием осреднения-параметризации спектров. Важно отметить, что и реперные и экономичные

расчеты выполняются по одним и тем же транспортным кодам. Это исключает возможные сторонние ошибки, не связанные непосредственно с осреднением спектров. 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. Вариант позволяет эффективно использовать параллельные вычисления на графических процессорах. Приводятся данные по сокращению общего времени счета.

Численные методы реализованы в комплексе транспортных кодов. Представлены результаты тестирования кодов путем сопоставления с расчетами по известной программе DISORT (DISORT-расчеты выполнены диссертантом) и результатами расчетов, выполненных другими научными группами в рамках международного проекта Continual Intercomparison of Radiation Codes.

Также в первой главе в целях упреждения возможных вопросов изложен применяемый диссертантом алгоритм восстановления детального коэффициента молекулярного поглощения на разных высотах атмосферы на основе параметров линий банка HITRAN.

В второй главе описан метод осреднения-параметризации спектра поглощения и спектра поля излучения, формируемого вблизи молекулярных линий. Метод использует лебегову меру для интегрирования резонансов поглощения/испускания. Также метод учитывает искажения, вызываемые неоднородным изменением концентраций газов с высотой атмосферы. В этих целях перед осреднением по лебеговой мере производится грубое деление спектра на широкие каналы, в которые включаются сильные линии поглощения только одного какого-либо газа (носители резонансов того или иного газа). Приводятся формулы осреднения «сторонних» сечений рассеяния излучения на частицах аэрозолей и облаков. Отмечу, что в целом применяемый автором метод осреднения-параметризации спектров логичен, разумен, не содержит грубых априорных предположений (этим часто грешат методы осреднения), прост в реализации и позволяет варьировать число каналов осреднения в широких пределах.

Точность метода осреднения устанавливается с помощью сопоставления с результатами независимых реперных поточечных расчетов

спектров излучения, которые значительно более трудоемки. Показано, что вариант осреднения спектра теплового излучения в 280 каналов обеспечивает точность расчета основных функционалов поля излучения не ниже 1-2 % как в безоблачной, так и в облачной атмосферах. В качестве функционалов диссертант использовал суммарную по спектру скорость нагрева-охлаждения единичного объема газа, суммарные восходящие и нисходящие потоки тепла, переносимого излучением.

Третья глава методологически повторяет вторую главу, за тем исключением, что предметом исследования является спектральное осреднение процессов переноса солнечного излучения в безоблачной и облачной атмосфере. Приведу только окончательный результат. Осреднение-параметризация оптических характеристик и спектров в 318 каналов обеспечивает точность расчета функционалов не ниже 1%.

В Заключении диссертант сформулировал результаты проделанной работы и результаты, которые выносятся на защиту.

К достоинствам диссертационной работы относится разработка верифицированных численных методов и эффективного радиационного блока для использования в программах расчета общей циркуляции атмосферы.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации подтверждается использованием строгого математического аппарата, численных алгоритмов с известной областью устойчивости, и подкреплена сравнением с результатами как собственных поточечных «Line-by-Line»-расчетов спектров излучений, так и с результатами расчетов других научных групп в части проверки точности описания пространственно-углового распределения излучения при многократном рассеянии на частицах облаков и аэрозолей. Результаты работы докладывались на международных всероссийских конференциях и достаточно полно отражены в публикациях в периодических изданиях, индексируемых в системах цитирования Scopus и Web of Science.

Новизна диссертационной работы состоит в предложенных автором методиках осреднения спектров атмосферной радиации. В ней представлен ряд новых результатов, которые имеют большую практическую ценность для проблем численного моделирования переноса излучения, циркуляции атмосферы Земли и климата. Автором показано, что применение экономичных и точных методов позволяет легко выполнять серии расчетов переноса атмосферной радиации. В будущем это позволит всесторонне и

достоверно исследовать, например, воздействие облаков и изменений концентрации водяного пара на энергетику атмосферы и региональный климат с помощью моделей циркуляции с высоким пространственным разрешением.

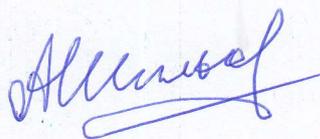
Недостатки. 1) К сожалению, автор не приводит в тексте конкретные цифры по сокращению числа арифметических операций и объема памяти компьютера, которые дает применение используемого метода осреднения спектров в сравнении с поточечными «Line-by-Line»-расчетами при точности 1%, 5%,... Часто в работах можно встретить утверждение, что применение такой-то схемы (метода) приводит к экономии времени или увеличивает точность в 3-5 раз и это здорово. В данном случае, по моим оценкам, речь идет о сокращении операций не менее чем на 2-3 порядка, но эти цифры не приведены.

2) В тексте работы не приведены данные по оптимизации сетки по высоте в облачной атмосфере. Ответ на вопрос важен при встраивании радиационного блока в модель общей циркуляции. Для достаточно точного описания многократного рассеяния излучения, по-видимому, необходима более подробная сетка вблизи границы облака. Выбор «сгущение против потери в точности» зависит от применяемого метода расчета пространственно-углового распределения излучения.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки работы.

Заключение. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, вносящей весомый вклад в разработку новых методов расчета переноса атмосферной радиации, содержание и результаты работы соответствуют паспорту научной специальности 1.2.2.— «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021) «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Федотова Екатерина Алфеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2.— «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент



кандидат физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник отдела № 6
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Шильков Александр Викторович

30.01.2023 г.

Федеральное государственное учреждение «Федеральный
исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В.
Келдыша Российской академии Наук»

Адрес: 125047, Москва, Миусская пл., д.4, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Официальный сайт организации : <https://www.keldysh.ru>

Телефон: +7 499 978-13-14

E-mail: ale-shil'kov@yandex.ru

Подпись Шилькова Александра Викторовича удостоверяю:

Ученый секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша

к.ф.-м.н.

А.А. Давыдов

