



УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора ФГБНУ «Полярный геофизический институт», к.ф.-м.н.

Гомонов А.Д.

8 августа 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Полярный геофизический институт»

Диссертация «Численное моделирование нагрева атмосферы Земли солнечным и тепловым излучением» выполнена в федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Полярный геофизический институт».

В период подготовки диссертации соискатель Федотова Екатерина Алфеевна работала в федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Полярный геофизический институт», в секторе вычислительного эксперимента, в должности младшего научного сотрудника.

В 2012 г. Федотова Екатерина Алфеевна окончила Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет» по специальности 010700.68 физика.

В 2021 году Федотова Е.А. была прикреплена в качестве экстерна для сдачи кандидатских экзаменов к аспирантуре Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в 2021 г. федеральным государственным учреждением «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Мингалев Игорь Викторович является исполняющим обязанности директора Федерального Государственного бюджетного научного учреждения «Полярный геофизический институт».

По итогам рассмотрения диссертации принято следующее заключение:

Диссертационная работа посвящена численному моделированию нагрева атмосферы Земли солнечным излучением и собственным тепловым излучением. Главной целью этой работы является создание двух комплексов программ, предназначенных для расчета в нижней и средней атмосфере Земли поля солнечного излучения и поля собственного ИК излучения атмосферы, которые должны обеспечивать хорошую точность расчета с учетом рассеяния в облаках и использовать параллельные вычисления на графических процессорах для

обеспечения высокого быстродействия. Эти комплексы программ были созданы, протестированы и включены в радиационный блок модели общей циркуляции атмосферы Земли, которая разрабатывается в секторе вычислительного эксперимента Полярного геофизического института.

Все выносимые на защиту результаты получены либо лично Федотовой Е.А., либо в составе группы при ее решающем вкладе. Она проводила расчеты, результаты которых использованы в данной диссертации и наравне с другими соавторами участвовала в написании научных работ, опубликованных по теме диссертации.

Достоверность результатов диссертации определяется корректностью применения уравнений переноса излучения в атмосфере Земли, высокой точностью применяемых численных методов, которая подтверждена результатами тестовых расчетов и их совпадением с результатами тестовых расчетов других авторов, а также согласием между результатами численного моделирования и данными наблюдений.

Научная новизна работы состоит в следующем. Впервые разработана методика расчета коэффициента молекулярного поглощения, использующая параллельные вычисления на графических процессорах. Разработан новый 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, который максимально использует блочную структуру матрицы коэффициентов системы и является точным методом, а также позволяет эффективно использовать параллельные вычисления на графических процессорах. Созданы два комплекса программ, предназначенные для расчетов поля собственного излучения в атмосфере Земли в ИК-диапазоне от 10 до 10000 см^{-1} и поля солнечного излучения в атмосфере Земли 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. Оба комплекса используют параллельные вычисления на графических процессорах с помощью технологии CUDA и позволяют проводить большой объем вычислений. Впервые разработан 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. Впервые создана параметризация оптических характеристик атмосферы Земли в частотном интервале от 10 до 2000 см^{-1} , предназначенная для расчетов поля собственного ИК-излучения атмосферы в интервале высот от поверхности Земли до высоты 70 км, содержащая 280 модельных каналов, учитывающая изменение газового

состава с высотой и обладающая хорошей точностью во всем указанном диапазоне высот. Впервые создана параметризация оптических характеристик атмосферы Земли в частотном интервале от 2000 до 50000 см^{-1} , предназначенная для расчетов поля солнечного излучения в интервале высот от поверхности Земли до высоты 70 км, содержащая 318 модельных каналов, учитывающая изменение газового состава с высотой и обладающая хорошей точностью во всем указанном диапазоне высот.

Научную и практическую ценность представляют комплексы программ, предназначенные для расчетов с высоким спектральным разрешением поля собственного излучения в атмосфере Земли в ИК-диапазоне и для расчетов с высоким спектральным разрешением поля солнечного излучения в атмосфере Земли. Оба комплекса используют параллельные вычисления на графических процессорах и позволяют проводить большой объем научных расчетов. Также научную ценность представляют выявленные с помощью моделирования закономерности нагрева-охлаждения воздуха в нижней и средней атмосфере Земли за счет собственного излучения атмосферы в ИК-диапазоне и за счет солнечного излучения при наличии облачных слоев большой оптической толщины. Научную ценность также представляют методы построения параметризаций, предназначенные для расчетов полей собственного и солнечного излучения, которые учитывают различия газового состава в средней и нижней атмосфере и обеспечивают хорошую точность расчетов в нижней и средней атмосфере Земли, как при наличии облачных слоев с большой оптической толщиной, так и при отсутствии облаков.

Практическую ценность представляют параметризация оптических характеристик атмосферы Земли в интервале высот от поверхности Земли до высоты 70 км в частотном интервале от 10 до 3000 см^{-1} , предназначенная для расчетов поля собственного ИК-излучения атмосферы, и параметризация оптических характеристик атмосферы Земли в частотном интервале от 2000 до 50000 см^{-1} , предназначенная для расчетов поля солнечного излучения. На основе этих параметризаций создан радиационный блок модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли.

Материалы диссертации полно представлены в работах, опубликованных соискателем. Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня ВАК:

1. *Н.И. Игнатъев, И.В. Мингалев, А.В. Родин, Е.А. Федотова.* Новый вариант метода дискретных ординат для расчета собственного излучения в горизонтально однородной атмосфере // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2015, том 55, № 10, С. 1741–1755.
2. *Б.Н. Четверушкин, И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, К.Г. Орлов, В.М. Чечеткин, В.С. Мингалев.* Расчет собственного излучения атмосферы в модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // Математическое моделирование, 2020, том 32, № 2, С. 77–100.

3. *Б.Н. Четверушкин, И.В. Мингалев, В.М. Чечеткин, К.Г. Орлов, Е.А. Федотова, В.С. Мингалев, О.В. Мингалев.* Модели общей циркуляции атмосферы Земли. Достижения и направления развития // Математическое моделирование. 2020, т. 32, № 11, С. 29–46.
4. *И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, К.Г. Орлов.* Построение параметризаций молекулярного поглощения в нижней и средней атмосфере Земли в ИК-диапазоне // Оптика атмосферы и океана. 2018. т. 31, № 10, С. 779–786.
5. *И. В. Мингалев, Е. А. Федотова, К. Г. Орлов.* Влияние оптически толстых слоев на нагрев атмосферы собственным излучением // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. т. 14, № 5, С. 100–108.
6. *И.В. Мингалев, К.Г. Орлов, Е.А. Федотова.* Учет нарушения локального термодинамического равновесия в верхней атмосфере Земли в колебательных полосах молекул углекислого газа в радиационном блоке модели общей циркуляции атмосферы Земли // Известия РАН. Серия Физическая. 2021. т. 85, № 3, С. 393–397.
7. *Б.Н. Четверушкин, И.В. Мингалев, В.М. Чечеткин, К.Г. Орлов, Е.А. Федотова, В.С. Мингалев.* Модели общей циркуляции атмосферы Земли. Достижения и направления развития // Математическое моделирование, 2022, том 34, № 3, С. 43–70.
8. *И.В. Мингалев, К.Г. Орлов, Е.А. Федотова, В.С. Мингалев.* Численное моделирование общей циркуляции нижней и средней атмосферы земли в середине января // Известия РАН. Серия Физическая. 2022. том 86, № 3, С. 434–444.
9. *Е.А. Федотова.* Тестирование радиационного блока модели общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли // Математическое моделирование, 2022, том 34, № 8, С. 38–58.

Диссертация «Численное моделирование нагрева атмосферы Земли солнечным и тепловым излучением» Федотовой Екатерины Алфеевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата наук по специальности 1.2.2 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на заседании ученого совета ФГБНУ «Полярный геофизический институт». Присутствовало на заседании 11 чел. Выступили с положительной оценкой диссертации: 11. Результаты голосования: "за"- 11 чел., "против"- 0 чел., "воздержалось"— 0 чел., протокол N 2 от 18 марта 2022 г.

Заместитель директора ПГИ
по научной работе, к.ф.-м.н.



Орлов К.Г.