

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех)

На правах рукописи

Разумовский Михаил Владимирович

**Разработка параметризаций молекулярного поглощения с
минимальным количеством k -членов для моделирования
переноса излучения в атмосфере Венеры**

Специальность 1.3.1 Физика космоса, астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2026

Работа выполнена в _____.

Научный руководитель: Фомин Борис Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент

Официальные
оппоненты: _____

Ведущая организация: _____

Защита состоится «_____» _____ 2026 года в _____ часов _____ минут на заседании диссертационного совета _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

и на сайте организации

_____.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Моделирование переноса излучения является необходимой частью исследования климата и общей циркуляции атмосферы Венеры: радиационные потоки определяют распределение источников и стоков энергии, а скорости нагрева и охлаждения входят в термодинамическое уравнение системы уравнений гидродинамики. Для Венеры эта связь особенно существенна из-за сочетания плотной CO_2 -атмосферы, высоких температур и давлений, глобального облачного слоя и сильной вертикальной неоднородности среды [1; 2]. При этом от радиационного блока модели общей циркуляции (GCM) требуется воспроизводить прежде всего пространственное распределение нагрева и охлаждения: именно оно задаёт контраст нагрева между экватором и полюсом и вертикальную структуру устойчивости, от которых зависят режимы циркуляции — поддержание экваториальной суперротации, положение и интенсивность струйных течений, тепловые приливы [3; 4]. Это распределение определяется разностями потоков на соседних уровнях и потому чувствительно к оптическим свойствам газа и облаков.

Основное препятствие имеет вычислительный характер и связано со спектральной размерностью задачи. Эталонный квазимонохроматический расчёт потоков на широких спектральных интервалах занимает значительное вычислительное время: шаг такого расчёта должен быть близок к шагу сетки, на которой line-by-line методом получен исходный молекулярный спектр, то есть уравнение переноса излучения приходится решать для миллионов спектральных точек. В GCM же радиационный отклик нужно обновлять для тысяч атмосферных столбцов на каждом радиационном временном шаге. Конвенциональный метод k -корреляций широко применяется, однако и в нём число решений уравнения переноса излучения на один атмосферный столбец остаётся достаточно большим в зависимости от спектрального разбиения и числа квадратурных узлов [5—7]. Высокая стоимость одного расчёта вынуждает обновлять радиацию редко, что само по себе требует проверки чувствительности решения и препятствует развитию самосогласованной связи облачных свойств и радиации [8; 9]. Поэтому актуально построение параметризаций с малым числом k -членов при контроле точности по потокам и скоростям нагрева, а число решений уравнения переноса на столбец служит непосредственной мерой эффективности такого представления.

Отдельную проблему составляет получение самих молекулярных спектров. При венерианских температурах и давлениях существенны полнота списков переходов, уширение при столкновениях с CO_2 , форма дальних крыльев и границы спектрального учёта линий. Области слабого поглощения, имеющие высокую степень неопределённости данных, участвуют в радиационном обмене нижней атмосферы, так что выбор спектроскопической модели влияет и на широкополосные радиационные величины. Детальность line-by-line расчёта сама по себе не устраняет неопределённости исходных физических данных [2; 10],

поэтому нужны средства быстрого пересчёта спектров при изменении входных параметров. Дополнительную значимость этой гибкости придаёт использование Венеры как наблюдаемого аналога плотных атмосфер каменных экзопланет [11; 12].

Степень разработанности темы. Способы включения радиации в модели общей циркуляции Венеры различаются тем, насколько глубоко радиационный расчёт замещается заранее подготовленной параметризацией. Простейшие схемы задают профили нагрева или используют ньютоновскую релаксацию к равновесной температуре; более развитые параметризуют сами скорости радиационного нагрева и охлаждения — через коэффициенты попарного межслойного обмена или через предвычисленный отклик на изменения температуры и других параметров [13; 14]. Такие представления быстры, но привязаны к набору расчётов, на котором они построены, и неясно переносятся на изменённые условия. Самосогласованный путь, при котором уравнение переноса решается в ходе интегрирования модели по обновляемой оптике, требует компактного спектрального представления поглощения; для Венеры таких реализаций немного, и все они опираются на метод k -корреляций [5—7].

Инструментальная основа расчёта молекулярного поглощения за последние десятилетия существенно развилась. Спектроскопические каталоги HITRAN и NITEMP, а также специализированные высокотемпературные списки переходов дают параметры линий, пригодные в том числе для горячей нижней атмосферы Венеры [15—18]. Доступны и открытые line-by-line инструменты — NAPI, ExoCross, RADIS, HELIOS-K, — реализующие ускоренное вычисление профилей линий, интерполяционные схемы и расчёты на графических процессорах [19—22]. Таким образом, узким местом является не получение спектра как таковое, а физическая модель поглощения: и в задачах дистанционного зондирования, и в расчётах теплового баланса поглощение CO_2 в окнах прозрачности описывается суммой line-by-line вклада с обрезанием линий, эмпирического χ -фактора и добавочного континуума. Эти составляющие подбираются совместно и потому не разделяют физические механизмы — коррекцию формы крыла, интерференцию линий и столкновительно-индуцированное поглощение, — а лабораторные данные, на которых построены χ -факторы, ограничены по спектральному и температурному покрытию, так что на практике поправки применяются далеко за пределами условий, в которых были получены [2]. Попытка собрать эти вклады в единую самосогласованную спектроскопическую модель предпринята в работе [10], однако детальные радиационные расчёты для условий Венеры на её основе пока не выполнялись, так что устойчивость получаемых потоков и скоростей нагрева к такому описанию остаётся непроверенной.

Цель и задачи работы. Цель диссертационной работы — разработка параметризаций молекулярного поглощения для моделирования тепловой и солнечной радиации в атмосфере Венеры с числом k -членов, минимально необходимым при заданной точности воспроизведения эталонных потоков и скоростей

нагрева или охлаждения. Достижение этой цели предполагает получение детальных спектров, подготовку эталонных радиационных расчётов и выделение эффективного поглощения в форме, пригодной для использования в радиационных блоках моделей общей циркуляции.

В соответствии с этой целью поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать вычислительные ограничения радиационных блоков GCM и особенности молекулярного поглощения в атмосфере Венеры, существенные для построения и проверки компактных спектральных параметризаций.
2. Разработать инструмент MARFA для эффективного line-by-line расчёта сечений и коэффициентов поглощения на атмосферной сетке; обеспечить изменение спектроскопических данных, профилей линий, поправок к крыльям и границ обрезания; проверить численную точность и быстродействие в выбранных конфигурациях.
3. Сформулировать flux-fitting k -distribution как самостоятельную процедуру построения параметризации. Описать восстановление эффективного поглощения для теплового и солнечного излучения, учёт источников и нескольких газов, выбор спектральных подмножеств и контроль числа членов.
4. Адаптировать эталонную модель на основе метода Монте-Карло к венерианским условиям; согласовать атмосферные профили, газовую и облачную оптику, источники и граничные условия для построения и последующей проверки параметризаций.
5. Построить параметризацию поглощения теплового излучения в диапазоне $10\text{--}6000\text{ см}^{-1}$: установить, вклад каких газовых поглотителей существен для интегральных потоков и скоростей охлаждения, выделить спектральные интервалы и отвечающие им k -члены, проверить их чувствительность к температурному профилю и, если она существенна, представить программу пересчёта k -членов по заданному профилю температуры.
6. Построить параметризацию поглощения солнечного излучения: определить, какие газы и в каких спектральных областях влияют на интегральные потоки и скорости нагрева, а где газовым поглощением можно пренебречь; учесть чувствительность к разным вариантам профилей SO_2 и неизвестного ультрафиолетового поглотителя.

Научная новизна. Впервые высокоэффективный line-by-line расчёт молекулярных спектров для условий Венеры построен так, что спектроскопическая модель остаётся сменной: каталог линий, форма контура, поправки к дальним крыльям и границы спектрального учёта задаются независимо друг от друга, а спектры для всех уровней атмосферы рассчитываются на общей сетке. Это позволяет не только готовить газовую оптику для эталонных радиационных расчётов, но и исследовать чувствительность молекулярных спектров к самим спектроскопическим предположениям, выбор которых для Венеры до сих пор не устоялся.

Flux-fitting k -distribution впервые выделен и сформулирован как самостоятельная процедура построения параметризации, не привязанная к конкретной радиационной модели: её результат пригоден для произвольного метода решения уравнения переноса излучения. В отличие от метода k -корреляций, процедура не опирается на предположение о сохранении ранговой корреляции спектров по высоте, а требуемая точность воспроизведения потоков и скоростей нагрева или охлаждения входит в само построение — ею определяются спектральное разбиение и число k -членов.

Для теплового излучения Венеры этим способом впервые получена параметризация, охватывающая диапазон от 10 см^{-1} до границы ближнего инфракрасного диапазона и учитывающая CO_2 , H_2O и SO_2 одновременно; её точность установлена не только по потокам, но и по скоростям радиационного охлаждения, для нескольких температурных профилей, с облаками и многократным рассеянием.

Для солнечного излучения та же процедура впервые применена к двум областям с разными исходными спектроскопическими данными: к ультрафиолетовому диапазону, где поглощение задаётся измеренными сечениями фотопоглощения и требует учёта неизвестного УФ-поглотителя, и к коротковолновой области, где оно восстанавливается из line-by-line спектров. Тем самым тепловая и солнечная радиация Венеры впервые описаны компактными наборами эффективного поглощения, построенными единым методом и проверенными относительно общей эталонной модели.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы состоит в том, что компактное представление молекулярного поглощения строится непосредственно по радиационным величинам — потокам и скоростям нагрева или выхолаживания, — а не по статистическим характеристикам спектра, как в стандартном методе k -корреляций. Такое построение не требует предположения о сохранении ранговой корреляции спектров по высоте, которое в плотной и сильно неоднородной атмосфере Венеры может приводить к систематическим ошибкам. Более явная привязка параметризаций к эталонным расчётам радиации оказывается важна для спектральной постановки задачи для Венеры, где выбор каталога линий, формы контура, границы спектрального учёта линий и поправок к их крыльям не зафиксирован, а влияние этого выбора на потоки и радиационный баланс остаётся предметом обсуждения.

Практическая значимость определяется тем, что полученные наборы эффективного поглощения доведены до формы, пригодной для прямого использования в радиационных блоках моделей общей циркуляции Венеры: полный радиационный расчёт с параметризациями для атмосферного столбца требует всего 78 решений уравнения переноса излучения. Программный комплекс MARFA также имеет независимую практическую значимость — для перерасчёта молекулярных спектров в широких диапазонах в высоком разрешении при смене спектроскопических предположений.

Методология и методы исследования. Методология работы объединяет расчёт спектров молекулярного поглощения, получение эталонных радиационных величин и построение компактных параметризаций. При проверке эталонный и параметризованный расчёты используют согласованные физические входы, что позволяет выделить ошибку выстраиваемых эффективных приближений. В тепловой и коротковолновой областях используется line-by-line суммирование вкладов спектральных переходов. Интенсивности и ширины линий приводятся к условиям атмосферных уровней; выбор каталогов линий, функций профиля, поправок и обрезаний относится к физической постановке. Многосеточная техника, лежащая в основе инструмента MARFA, уменьшает число прямых вычислений профилей и выполняет каскадную интерполяцию накопленного поглощения. В УФ-области используются готовые измеренные сечения фотопоглощения, поэтому line-by-line расчёт не требуется. Оптические свойства облаков рассчитываются по теории Ми для принятого состава и распределений частиц.

Эталонная модель использует известный прямой алгоритм Монте-Карло с учётом многократного рассеяния. Принимаются плоскопараллельная слоистая атмосфера и упругое рассеяние; для теплового излучения — локальное термодинамическое равновесие. Учитываются газовое и облачное поглощение, молекулярное и облачное рассеяние, излучение атмосферы и поверхности либо падающее солнечное излучение. Рассчитываются вертикальные профили восходящих и нисходящих потоков и скоростей нагрева или охлаждения. Параметризация строится по эталонным потокам в исключительно поглощающей газовой атмосфере. Для теплового излучения эффективное поглощение восстанавливается послойно с учётом собственного излучения; а для солнечного — по ослаблению прямого пучка. Спектральное разбиение уточняется, если текущий набор k -членов не удовлетворяет критерию точности. Готовые коэффициенты затем фиксируются и проверяются в полной постановке с облаками и многократным рассеянием.

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработана эффективная line-by-line модель расчёта молекулярных спектров в атмосфере Венеры при больших границах обрезания спектральных линий, допускающая гибкую смену контуров линий, поправок к их крыльям и спектроскопических данных. Модель реализована в программном комплексе MARFA, находящемся в открытом доступе и пригодном для подготовки входных данных радиационных блоков климатических моделей.
2. Предложен flux-fitting k -distribution метод построения параметризаций газового поглощения для условий атмосферы Венеры, в котором эффективное поглощение восстанавливается непосредственно по эталонным радиационным потокам, а спектральное разбиение и число k -членов определяются адаптивно — по достижении заданной точности воспроизведения потоков.

3. В тепловом инфракрасном диапазоне $10\text{--}6000\text{ см}^{-1}$ разработана параметризация поглощения CO_2 , H_2O и SO_2 в атмосфере Венеры, представляющая этот диапазон 16 спектральными интервалами и 32 k -членами и требующая 32 решения уравнения переноса излучения; расхождения восходящих потоков с эталонными расчётами не превышают 2 % ниже 95 км.
4. В диапазоне $2030\text{--}80000\text{ см}^{-1}$ разработаны параметризации газового поглощения солнечного излучения в атмосфере Венеры, включающие 19 спектральных интервалов и 46 k -членов: 11 интервалов и 38 k -членов в коротковолновой области $2030\text{--}15000\text{ см}^{-1}$ и 8 интервалов по одному k -члену в каждом в ультрафиолетовом диапазоне 125–400 нм; в УФ-диапазоне расхождения с эталонными расчётами не превышают 3 % для потоков и 1 % для скоростей нагрева. Ошибки в восходящих потоках в области $2030\text{--}15000\text{ см}^{-1}$ составили менее 2%.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.1 «Физика космоса, астрономия». Методика line-by-line расчёта молекулярных спектров, расчёты переноса излучения и построение параметризаций поглощения в УФ-, коротковолновом и тепловом ИК-диапазонах соответствуют пункту 1 паспорта, связанному с исследованием процессов распространения и поглощения излучения в космических средах и разработкой методов анализа излучения в различных спектральных диапазонах. Результаты по атмосфере Венеры, включая учёт молекулярного поглощения CO_2 , H_2O , SO_2 и других компонентов, а также расчёты радиационных потоков, скоростей нагрева и выхолаживания, соответствуют пункту 5 паспорта, связанному с исследованиями строения и состава планетных атмосфер тел Солнечной системы. Применимость разработанных методик к экзопланетным атмосферам и использование Венеры как физического аналога таких атмосфер соответствуют пункту 6 паспорта, относящемуся к исследованию экзопланет. Программный комплекс MARFA, вычислительные инструменты расчёта спектров и подготовленные параметризации для радиационных блоков климатических моделей соответствуют пункту 14 паспорта, связанному с методами вычислительной астрофизики и алгоритмами обработки данных для космических и астрономических исследований.

Личный вклад автора. Основные результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Автор разработал архитектуру и значительную часть реализации MARFA, выполнил постановку расчётов молекулярных спектров, подготовку спектроскопических данных и тестирование разработанных инструментов. Автор участвовал в формулировке flux-fitting k -distribution метода, разработке эталонной модели для условий атмосферы Венеры, а также в построении параметризаций, анализе их точности и подготовке программ и публикаций по теме диссертации.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается тем, что в основу работы положены алгоритмы и методы, отработанные и многократно проверенные для земной атмосферы: многосеточная интерполяционная техника суммирования вкладов спектральных линий, техника построения параметризаций и решение уравнения переноса излучения методом Монте-Карло. Перенос на условия Венеры сопровождался независимыми проверками. Используются актуальные для Венеры спектроскопические данные и общепринятые модели атмосферы и облачного слоя.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах:

1. 22-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)», Москва, Россия, 2024 г.;
2. 21-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, Россия, 2023 г.;
3. 11-й Московский международный симпозиум по исследованиям Солнечной системы, Москва, Россия, 2020 г.;
4. семинар отдела № 53 «Физика планет» Института космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия;
5. 62-я Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия, 2019 г.;
6. 1-й Международный аэрокосмический симпозиум Silk Road 2018, Долгопрудный, Россия, 6–8 декабря 2018 г.

Структура работы. Диссертация включает четыре содержательные главы, заключение, список литературы и приложение. Первая глава содержит обзор и постановку проблем радиационного переноса и молекулярного поглощения в приложениях к моделированию венерианского климата. Во второй главе последовательно изложена методология, использованная в работе: line-by-line инструмент MARFA, flux-fitting k -distribution техника и эталонная модель переноса излучения. На основе этих методов третья глава посвящена построению параметризаций поглощения теплового излучения, а четвёртая — параметризациям поглощения солнечного излучения.

Содержание работы

В первой главе «Обзор и проблематика области» рассмотрены задачи радиационного переноса в моделях планетного климата и расчёта молекулярных спектров для условий Венеры. Радиационный блок модели общей циркуляции поставляет в термодинамическое уравнение скорости изменения температуры, которые при принятом направлении результирующего потока вверх определяются его вертикальной дивергенцией:

$$Q_{\text{rad}}(z) \equiv \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{\text{rad}} = - \frac{1}{\rho(z)c_p} \frac{\partial F_{\text{net}}(z)}{\partial z}, \quad F_{\text{net}} = F^{\uparrow} - F^{\downarrow}. \quad (1)$$

Здесь ρ — плотность атмосферы, c_p — удельная теплоёмкость при постоянном давлении. Всякое изменение состояния атмосферы и её оптических свойств, вообще говоря, требует обновления этого отклика.

Центральное место в главе занимает проблема самосогласованного расчёта радиации в GCM. Самосогласованность означает, что радиационный отклик отвечает текущему состоянию атмосферы, то есть пересчитывается по обновлённым оптическим свойствам; стоимость такого пересчёта и ограничивает частоту обращений к радиационному блоку. При сопряжении радиации с динамикой различают три характерных масштаба времени: шаг динамического ядра Δt_{dyn} , интервал обновления радиации Δt_{rad} и время радиационной релаксации τ_{rad} . Первые две величины — параметры численной модели, третья характеризует физический отклик атмосферы и зависит от высоты. Для известных конфигураций GCM Венеры характерно $\Delta t_{\text{dyn}} \ll \Delta t_{\text{rad}}$, причём солнечная и тепловая части обновляются с существенно разной частотой: например, в OPUS-Vr при динамическом шаге 5 мин солнечная радиация пересчитывалась через 36 ч, а тепловая — через 1.5 ч модельного времени [23]. Стоимость радиационного блока задаёт здесь практический предел: для венерианских условий в GCM OASIS на него приходится от 50% полного времени расчёта в зависимости от частоты его вызова [24]. Вторая сторона той же проблемы — двусторонняя связь изменчивости облачного слоя и радиации, до сих пор не реализованная в GCM Венеры. Так, в облачной модели [9] рассчитывались конденсация, испарение, седиментация и перенос вещества, однако полученные изменения массы и кислотности облачных капель не использовались при пересчёте радиационных величин. Самосогласованное описание требует, чтобы изменения состава атмосферы и облачных свойств отражались в оптических свойствах, по которым вычисляются нагревы и охлаждения.

Подходы к построению радиационного блока разделены по тому, решается ли уравнение переноса излучения во время активной работы самой GCM. В offline-схемах используются заранее рассчитанные величины: табличные профили солнечного нагрева, матрицы отклика нагревов и охлаждений на изменение температурного профиля [14], матричные параметризации через коэффициенты межслойного обмена [13]. Ньютоновская релаксация задаёт эффективный

нагрев локально, тогда как в плотной атмосфере существенен обмен между слоями. К этой же группе примыкают модели машинного обучения, воспроизводящие потоки по атмосферным профилям: их обучающие данные формируются физическим радиационным блоком, поэтому область применимости определяется охваченными состояниями [24]. Такие схемы вычислительно дешёвы, но набор учитываемых воздействий в них фиксируется предварительными расчётами. Напротив, в online-схемах уравнение переноса решается непосредственно по обновлённым оптическим свойствам — именно к этой группе относится настоящая работа.

Основное вычислительное ограничение online-расчётов связано со спектральной размерностью. Радиационный отклик требует интегрирования спектральных потоков:

$$F(z) = \int_0^\infty F_\nu(z) d\nu, \quad Q_{\text{rad}}(z) = -\frac{1}{\rho(z)c_p} \frac{\partial}{\partial z} \int_0^\infty F_{\nu,\text{net}}(z) d\nu. \quad (2)$$

Здесь следует различать два этапа. Под line-by-line расчётом понимается построение спектрального коэффициента поглощения в каждом узле сетки суммированием вкладов отдельных молекулярных переходов с учётом интенсивности и профиля каждой линии. Полученный спектр служит входом для квази-монокроматического расчёта переноса, в котором уравнение решается в большом числе спектральных точек — на сетке с шагом, достаточно малым, чтобы воспроизвести быстрые изменения коэффициента поглощения и спектрального потока в центрах линий, их крыльях и промежутках между линиями. Прямое включение такой схемы в GCM неосуществимо, и даже замена квазимонокроматического расчёта методом k -корреляций оставляет стоимость слишком высокой при типовом горизонтальном разрешении [5].

Рассмотрен конвенциональный метод k -корреляций, в котором детальное интегрирование заменяется квадратурой по упорядоченным значениям поглощения, а число спектральных интервалов и квадратурных узлов задаёт эффективное количество решений уравнения переноса на атмосферный столбец. Для неоднородной атмосферы предполагается сохранение спектрального ранжирования между слоями, которое, вообще говоря, может нарушаться при изменении температуры, давления и относительных вкладов газов. Одновременно сильная декорреляция между удалёнными уровнями сама по себе не означает большой ошибки интегральных потоков, поскольку важен вклад частот, на которых происходит радиационный обмен [25]. Для компактных схем определяющим становится соотношение точности и числа таких решений на столбец. Уменьшать это число обоснованно позволяет контроль по эталонным потокам и скоростям нагрева или охлаждения [7; 26].

Отдельная задача — получение самих молекулярных спектров из исходных данных о молекулярных переходах. В высокотемпературных условиях необходимы списки линий, включающие переходы с возбуждённых уровней [16; 17; 27]. Для венерианских условий также необходимо использовать коэффициенты

уширения за счёт столкновений с CO_2 . Существенная дополнительная неопределённость связана с дальними крыльями линий и континуальным поглощением CO_2 . Термин «континуум» указывает не на конкретный физический механизм, а на плавность соответствующей составляющей поглощения, а в её формирование вносят вклад различные физические эффекты: отклонения дальних крыльев от лоренцевского профиля, интерференция линий, столкновительно-индуцированное поглощение и димеры. На практике поглощение CO_2 задаётся в виде

$$k_{\nu}^{\text{CO}_2} = k_{\nu, \text{bl}}(\chi, \Delta) + \alpha_{\nu} n_{\text{CO}_2}^2, \quad (3)$$

где Δ — граница обрезания линии, χ — безразмерный форм-фактор, учитывающий отклонение крыла от лоренцевского профиля (для CO_2 характерно сублоренцевское поведение, $\chi < 1$), а α_{ν} — коэффициент добавочного континуума. Модельное определение континуума зависит от принятого Δ , поэтому все три величины должны задаваться согласованно, иначе часть поглощения учитывается дважды. Лабораторные данные и эмпирические форм-факторы имеют при этом неодинаковое спектральное и температурное покрытие: параметризация [28] опирается на измерения в диапазоне 193–773 К, тогда как χ -фактор [29] получен при температурах, близких к комнатной. Перенос таких описаний в широких спектральных диапазонах на условия Венеры поэтому требует отдельной проверки [2]. Для энергетического баланса существенны области слабого поглощения между полосами CO_2 : в исследованиях равновесной температурной структуры выделены интервалы 20–30 и 3–7 мкм, где неопределённость поглощения особенно значима [8]. Для таких задач требуется описание поглощения, согласованное сразу во всём рассматриваемом диапазоне и явно разделяющее вклады разных физических механизмов. Работы в этом направлении ведутся: в частности, уточнены крылья и столкновительно-индуцированное поглощение CO_2 в интервале 2600–2900 см^{-1} , попадающем в одну из указанных областей [10].

В подразделе 1.1.4 Венера также рассматривается как наблюдаемая отправная точка для исследований венероподобных экзопланет. Такой контекст связывает радиационные задачи с изменениями состава атмосферы, давления, молярной массы и вращения планеты [12; 30], а возможность повторно рассчитывать спектры и строить параметризации при изменении условий становится существенным требованием к применяемым инструментам. В итоге глава 1 обосновывает две взаимосвязанные потребности: гибкий и эффективный расчёт молекулярного поглощения и компактное представление спектра, позволяющее пересчитывать радиационные величины с контролируемой точностью.

Во второй главе «Высокоточные и эффективные методы расчёта переноса излучения» представлена методология, последовательно связывающая детальный расчёт молекулярных спектров, эталонные расчёты радиационных потоков и построение компактных параметризаций поглощения для атмосферы

Венеры. Все три составляющие описаны как единая последовательность, опирающаяся на одну и ту же физическую постановку. Методология продолжает отечественную линию методов статистического моделирования переноса излучения, сформировавшуюся в задачах атмосферной оптики Земли и позднее развитую для эталонных расчётов и проверки климатических радиационных схем. Она объединяет эффективную интерполяционную технику line-by-line расчётов [31], моделирование переноса с многократным рассеянием методом Монте-Карло [32; 33] и построение быстрых радиационных моделей FKDM для длинноволнового и коротковолнового диапазонов [34; 35] в земной атмосфере. В настоящей работе эта линия адаптируется к Венере: рассматриваются инструмент MARFA, метод flux-fitting k -distribution и эталонная модель переноса излучения, используемая для построения и проверки параметризаций газового поглощения.

Расчёт молекулярных спектров и MARFA. Line-by-line инструмент MARFA разработан для эффективного пересчёта молекулярных спектров при изменении атмосферных условий, спектроскопических данных и модели поглощения [36]. Для Венеры, в силу существующих неопределённостей в описании поглощения на широких интервалах, существенна возможность сопоставлять описания дальних крыльев линий, не фиксируя единственный набор спектроскопических предположений. Каждый такой вариант требует повторного суммирования протяжённых крыльев большого числа линий на детальной сетке и для всех атмосферных уровней.

Вычислительное ядро инструмента основано на разнице масштабов изменения профиля в центре и крыльях линии. Центральная часть рассчитывается на мелкой сетке, а более плавные участки крыльев — на вспомогательных грубых сетках. Сетки являются общими для всех рассматриваемых линий. После накопления вкладов выполняется каскадная интерполяция: сумма с грубой сетки переносится на следующую и складывается с уже рассчитанными на ней вкладами. Процесс продолжается до выходной сетки (рис. 1). Интерполяция применяется к накопленным суммам, поэтому число переходов определяется числом сеток и не зависит от числа линий. Например, при расчётах поглощения в длинноволновом диапазоне имелось десять вспомогательных сеток и выходной шаг $1/2048 \text{ см}^{-1}$.

Атмосферные профили и спектроскопические данные задаются отдельно и не зависят от вычислительного ядра MARFA. Часть модели поглощения изменяется входными параметрами запуска: молекула, спектральный интервал, каталог линий, функция профиля, граница обрезания и атмосферный профиль. Используются параметры линий HITRAN и HITEMP, пересчёт интенсивностей по температуре опирается на табулированные статистические суммы TIPS, предусмотрены профили Лоренца, Гаусса и Фойгта, а также коррекции дальних крыльев линий CO_2 . Более глубокие изменения для расчётов — собственная функция профиля, пользовательская модель крыльев или другой каталог линий после предобработки — вносятся при помощи обращения

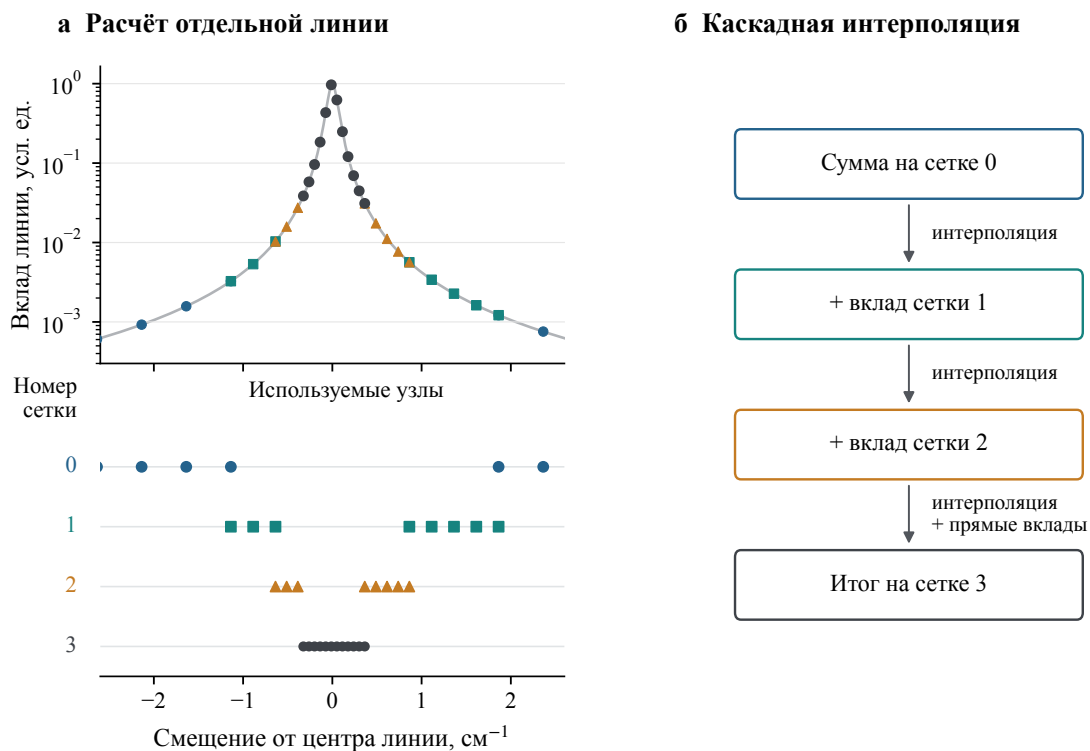


Рис. 1: Каскадная интерполяция в MARFA: **а** — расчёт лоренцевского профиля на сетках разного шага; **б** — перенос накопленного поглощения с грубых сеток на выходную. Число сеток сокращено до четырёх для наглядности; в MARFA используются 10 вспомогательных сеток и одна выходная.

непосредственно к кодовой базе. Для этого важны модульная архитектура и подробная документация, которые позволяют заменить отдельный компонент без затрагивания многосеточного алгоритма. Вместе с самим инструментом MARFA также предоставляется набор предзаданных венерианских данных — атмосферных профилей и спектроскопических настроек.

Результатом расчёта являются РТ-таблицы сечений или объёмных коэффициентов поглощения для всех уровней атмосферного профиля на общей равномерной сетке. Полученные таблицы служат входом эталонной модели переноса и используются при построении параметризаций. Область применимости определяется выбранными контурами и доступностью спектроскопических данных для рассматриваемых условий. Численная точность подтверждена сравнением с пакетом NAPI при одинаковом спектральном шаге около $5 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ [36]. В том же сравнении расчёт MARFA занимал примерно на два порядка меньше времени [36]. По замерам документации MARFA v1.2 расчёт диапазона 10–14000 см^{-1} на процессоре Apple M1 при границе обрезания 250 см^{-1} занимал 6 с для CO_2 и 3.8 с для H_2O на одну пару давления и температуры. Использовалась HITRAN2020 без отбрасывания слабых линий. Увеличение границы обрезания повышает стоимость расчёта сравнительно медленно: дальние крылья, где профиль линии меняется плавно, остаются на грубых сетках. Характерный пример применения инструмента к венерианским условиям приведён на рис. 2 [36].

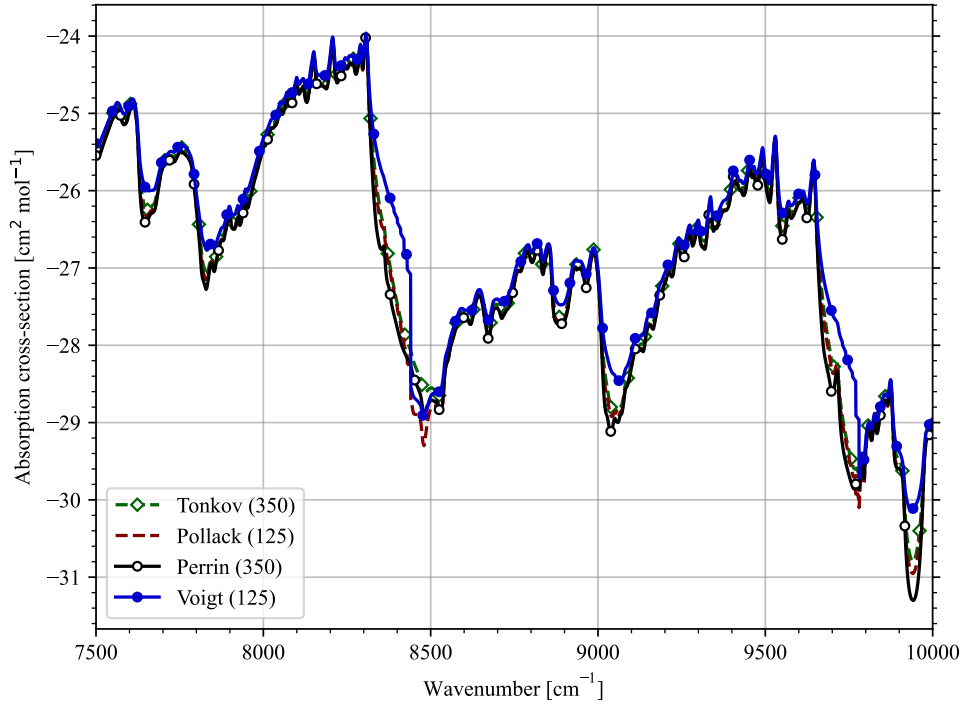


Рис. 2: Сечения поглощения CO_2 при $P = 92.1$ бар и $T = 735.3$ К для разных моделей дальних крыльев; числа в скобках — границы обрезания в cm^{-1} . Сечения даны в $\text{cm}^2/\text{молекулу}$. Воспроизведено из Razumovskiy, Fomin, Astanin [36].

Метод flux-fitting k -distribution. Метод сформулирован как самостоятельная процедура построения параметризации, не привязанная к конкретной быстрой радиационной модели [37]. Его организующий принцип — согласование с эталонными радиационными величинами, прежде всего интегральным потоком. Исходная рассматриваемая широкая спектральная область разбивается на спектральные интервалы, а внутри каждого интервала выделяются спектральные подмножества U_j . Каждому подмножеству сопоставляется высотный профиль эффективного коэффициента поглощения $k^*(z)$ — k -член параметризации, заменяющий вклад этого подмножества одним членом в конечной сумме по спектру. Итоговый набор записывается как

$$\mathcal{K} = \{\mathcal{K}_i\}_{i=1}^n, \quad \mathcal{K}_i = \{k_{i,j}^*(z)\}_{j=1}^{N_i}. \quad (4)$$

Здесь i нумерует спектральные интервалы, j — k -члены внутри интервала, а зависимость от высоты учитывает вертикальную неоднородность атмосферы. Общее число решений уравнения переноса излучения для одного атмосферного столбца равно суммарному числу k -членов $N = \sum_{i=1}^n N_i$. Число членов увеличивается при необходимости выполнить заданный критерий точности. Полученный набор удовлетворяет этому критерию при принятой процедуре разбиения.

Границы спектральных интервалов выбираются так, чтобы внутри каждого из них сравнительно слабо менялись величины, не связанные с молекулярным поглощением: оптические свойства облаков, индикатриса рассеяния и функция

Планка. Такие величины могут быть представлены репрезентативными значениями, тогда как быстрая спектральная изменчивость коэффициента поглощения описывается набором k -членов. Каждому члену сопоставляется собственный вклад источника излучения в зависимости от рассматриваемого типа излучения:

$$B_{U_j}(T) = \int_{U_j} B_\nu(T) d\nu, \quad S_{U_j} = \int_{U_j} E_{\odot,\nu} d\nu, \quad (5)$$

где $B_\nu(T)$ — функция Планка, а $E_{\odot,\nu}$ — солнечная спектральная облучённость площадки, нормальной к лучу, на верхней границе атмосферы. Тепловой источник каждого слоя вычисляется при его температуре, а S_{U_j} задаёт падающее солнечное излучение, приходящееся на соответствующий k -член. Доли этих интегралов в источнике всего интервала играют роль нормированных энергетических весов подмножеств и в общем случае не равны долям спектральной ширины. Поскольку в расчёт входят сами интегральные источники, потоки отдельных членов уже содержат эти веса, и поток интервала получается прямым суммированием, без дополнительного умножения на вес или ширину подмножества.

Восстановление эффективного поглощения и выбор подмножеств. Построение выполняется в исключительно поглощающей атмосфере: без облаков и без молекулярного рассеяния. Общая схема процедуры приведена на рис. 3, ниже поясняются её этапы. Для теплового излучения опорной величиной служит нисходящий поток. Накопленная оптическая толщина $\tau_{\text{eff}}^U(z)$ восстанавливается послойно сверху вниз: очередное значение τ_l определяется из условия согласования потоков

$$F_{\downarrow,\text{eff}}^U(z_l; \tau_l) = F_{\downarrow,\text{bl}}^U(z_l), \quad (6)$$

где левая часть вычисляется решением уравнения Шварцшильда с функцией источника $B_U[T(z)]$ текущего подмножества, а само уравнение решается бисекцией. Разность $\tau_l - \tau_{l-1}$ даёт оптическую толщину слоя; деление на его геометрическую толщину даёт эффективный коэффициент поглощения $k^*(z)$, а деление последнего на концентрацию газа $n_s(z)$ — эффективное сечение $\sigma_{\text{eff}}^U(z)$.

Для солнечного излучения опорной величиной служит прямой пучок: в такой атмосфере оптическая толщина восстанавливается непосредственно по закону Бугера

$$\tau_{\text{eff}}^U(z) = -\mu_0 \ln \mathcal{T}_U(z), \quad \mathcal{T}_U(z) = \frac{F_{\downarrow,\text{bl}}^U(z)}{\mu_0 S_U}, \quad (7)$$

где $\mu_0 = \cos \theta_0 > 0$, θ_0 — солнечный зенитный угол, $\mathcal{T}_U$ — пропускание прямого потока для подмножества U , а S_U — отвечающий этому подмножеству интеграл солнечной облучённости из выражения (5). Для коротковолновой области эффективное сечение удобно относить к количеству молекул вдоль прямого луча, а не к среднему по всему вышележащему столбу.

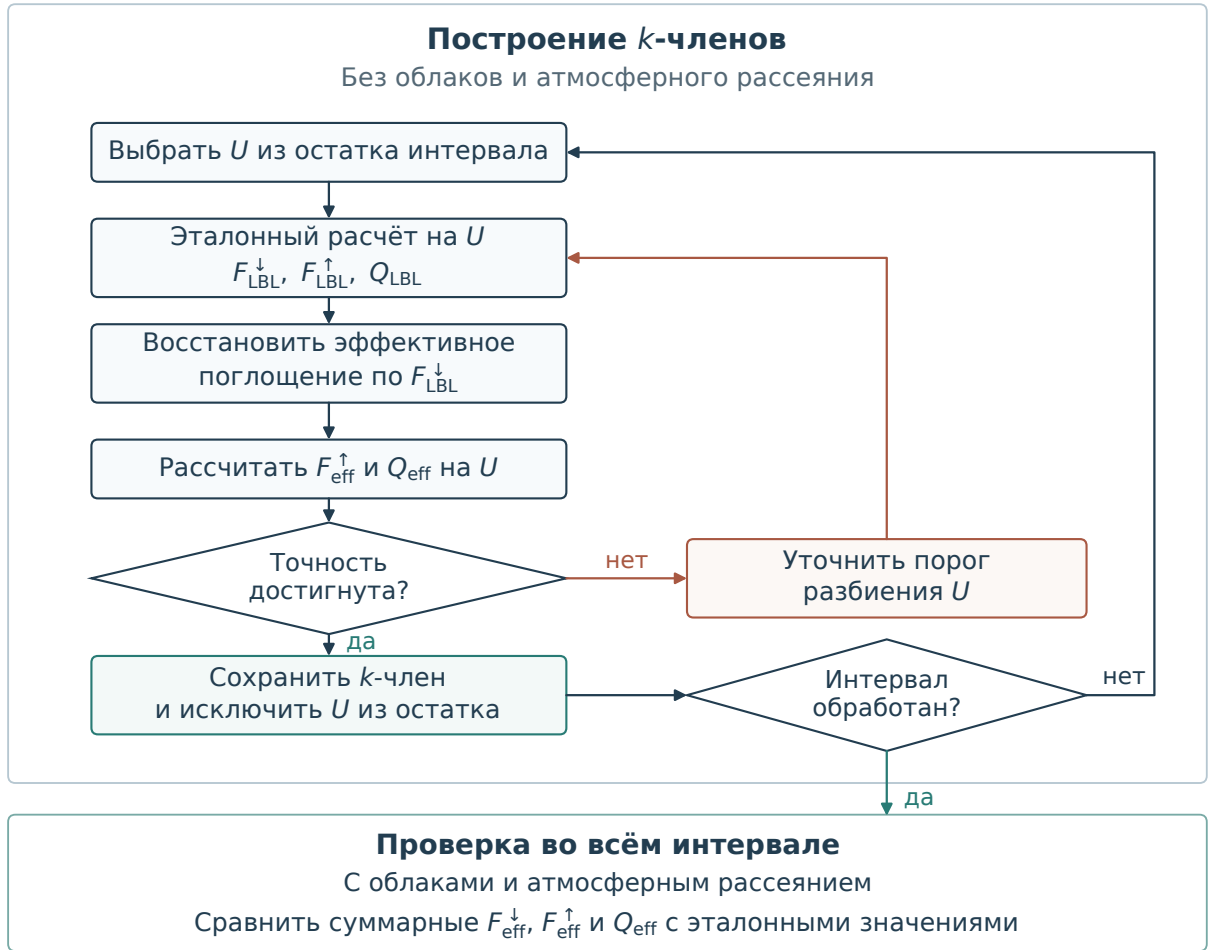


Рис. 3: Схема построения и валидации flux-fitting-параметризации.

Нисходящий поток согласуется с эталонным по построению, поэтому k -член принимается по величинам, непосредственно не использованным при восстановлении: восходящему потоку и скорости нагрева или охлаждения. Если точность недостаточна, интервал делится на подмножества по порогу сечения на опорном уровне:

$$\nu \in U_1 \iff \sigma_{\nu}(z_{\text{ref}}) < S_1. \quad (8)$$

Порог подбирается так, чтобы выделить наиболее широкое подмножество, ещё удовлетворяющее критерию точности; затем так же обрабатывается остаток интервала (рис. 4). Порог S_1 задаётся в единицах сечения и служит только для построения подмножеств; с источниками S_{U_j} он не связан.

Требуемая точность задаётся заранее как допустимое расхождение потоков и скоростей охлаждения с эталонными расчётами. Для длинноволновой области использован ориентир, близкий к критерию дивергенции потока $2 \times 10^{-4} \text{ Вт м}^{-3}$ из [7]: на высоте около 80 км он соответствует примерно 1.8 К сут^{-1} . Общепринятого критерия точности для радиационных блоков Венеры пока нет, поэтому это значение служит рабочим ориентиром, а не универсальным требованием.

В длинноволновом диапазоне разбиение строится по доминирующему поглотителю, а вклады остальных газов рассчитываются на тех же подмножествах

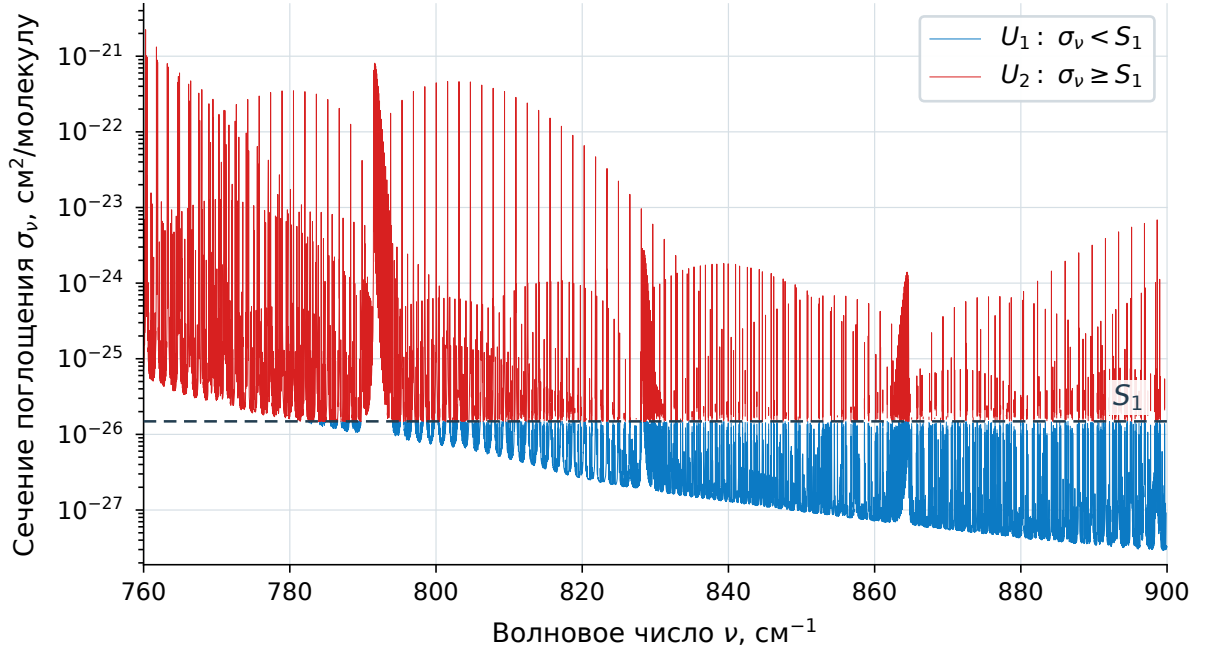


Рис. 4: Разбиение спектра CO_2 на подмножества U_1 и U_2 по порогу сечения S_1 на опорном уровне $z_{\text{ref}} = 78$ км. Расчёт MARFA по HITRAN2020.

и с учётом концентраций входят в общий коэффициент:

$$k_j^*(z) = \rho_{\text{dom}}(z) \sigma_{j,\text{eff}}^{(\text{dom})}(z) + \sum_{s \in \mathcal{S}_{\text{other}}} \rho_s(z) \sigma_{j,\text{eff}}^{(s)}(z), \quad j = 1, \dots, N_i. \quad (9)$$

Здесь ρ — концентрация, $\sigma_{j,\text{eff}}$ — эффективное сечение, а $\mathcal{S}_{\text{other}}$ — набор дополнительных газов. Выбор разбиения по одному компоненту является приближением, достаточность которого проверяется с полным принятым составом.

После построения полного набора k -членов для каждого спектрального интервала выполняется отдельная проверка с облачным поглощением и многократным рассеянием. Облачные свойства задаются в репрезентативных спектральных точках. Допуск по точности, принятый при построении, служит критерием выбора подмножеств, тогда как окончательная погрешность определяется этой проверкой; при невыполнении требований разбиение пересматривается.

Эталонная модель переноса излучения. Эталонные радиационные величины получаются решением уравнения переноса излучения в плоскопараллельной атмосфере, представленной горизонтально однородными слоями:

$$\mu \frac{\partial I_\nu(z, \mu, \varphi)}{\partial z} = -\alpha_\nu(z) [I_\nu(z, \mu, \varphi) - S_\nu(z, \mu, \varphi)], \quad (10)$$

$$S_\nu(z, \mu, \varphi) = [1 - \tilde{\omega}_\nu(z)] B_\nu[T(z)] + \frac{\tilde{\omega}_\nu(z)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P_\nu(\mu, \varphi; \mu', \varphi') I_\nu(z, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi', \quad (11)$$

где I_ν — интенсивность, α_ν — объёмный коэффициент экстинкции, $\tilde{\omega}_\nu$ — альбе-до однократного рассеяния, P_ν — индикатриса рассеяния, нормированная так, что её интеграл по полному телесному углу равен 4π , а B_ν — функция Планка. Рассматриваются скалярное поле излучения и упругое рассеяние; принимается локальное термодинамическое равновесие. Данное уравнение решается мето-дом Монте-Карло в алгоритмической реализации [33], адаптированной здесь к условиям Венеры.

Данный метод основан на статистическом моделировании отдельных исто-рий переноса излучения: волновое число и новые направления разыгрываются с вероятностями, определяемыми оптическими свойствами среды и индикатри-сой рассеяния, а радиационные величины оцениваются усреднением вкладов историй. Поглощение не разыгрывается как отдельное событие, а учитывает-ся непрерывным уменьшением веса траектории, $w_{m+1} = w_m \exp(-\Delta\tau_{\text{abs},m})$, где $\Delta\tau_{\text{abs},m}$ — оптическая толщина поглощения, накопленная на очередном участке пути. Оценка потока, проинтегрированного по интервалу шириной $\Delta\nu$, имеет вид

$$\hat{F}_{\Delta\nu}(z) = \frac{\Delta\nu}{K} \sum_{n=1}^K Y(z; i_n, \xi_n), \quad (12)$$

где K — число историй, i_n — выбранная для истории спектральная точка, ξ_n — совокупность случайных величин её траектории, а Y — вклад истории в поток на уровне z , учитывающий источник и текущий вес. Статистическая погреш-ность убывает как $K^{-1/2}$. При расчёте потока, интегрированного по широкому спектральному диапазону, типичное число историй составляет 1–10 на каждый узел квазимонохроматической сетки волновых чисел. Необходимое число исто-рий определяется требуемой точностью интегрального потока. Отдельного внимания требуют границы облаков, где недостаточное вертикальное разреше-ние влияет на дивергенцию потока даже при малой погрешности самих потоков.

Профили температуры, давления и газового состава, а также спектроскопи-ческие настройки являются входными данными и задаются отдельно для каж-дого расчёта; они приведены при описании третьей и четвёртой глав. Облачная оптика рассчитывается по теории Ми для каждой моды частиц, поэтому об-лачный слой задаётся не суммарной оптической толщиной, а отдельными ко-эффициентами поглощения и рассеяния. Для солнечного излучения задаются направленный падающий пучок, рэлеевское рассеяние и отражение ламберто-вой поверхностью; для теплового — отсутствие падающего излучения на верх-ней границе и чёрная поверхность с температурой нижнего уровня. Раздельный расчёт переноса солнечного и теплового излучения определяется различием ис-точников, поэтому их спектральные диапазоны могут перекрываться.

Проверка модели в условиях Венеры проведена по двум независимым ори-ентирам. Оптическая толщина всего облачного столба сопоставлена со стан-дартной облачной моделью [38] на девяти длинах волн (табл. 1): относительные расхождения не превышают 0.91%. Интегральные потоки на верхней границе

Таблица 1: Оптическая толщина облачного столба: эталонный расчёт и результаты Haus [et al.] [38, табл. 2].

λ , мкм	15	10	5	2.5	1.5	1	0.55	0.35	0.2
Haus [et al.] [38]	15.29	28.34	25.59	32.09	39.95	35.00	34.72	33.17	31.84
Расчёт	15.2	28.2	25.4	31.8	39.7	34.8	34.5	33.0	31.6
$ \Delta\tau /\tau_{\text{Haus}}$, %	0.59	0.49	0.74	0.90	0.63	0.57	0.63	0.51	0.75

атмосферы, усреднённые по планете, сопоставлены с литературными ориентирами [38]. Нисходящий солнечный поток составил 662 Вт м^{-2} при ориентире 667 Вт м^{-2} , восходящий солнечный — 535 Вт м^{-2} при ориентире 509 Вт м^{-2} , то есть с расхождением около 5%: строгое сравнение здесь требует согласования спектрального диапазона, облачной модели, УФ-поглотителя и пространственного осреднения. Исходящий тепловой поток составил 161 Вт м^{-2} при ориентире 159.7 Вт м^{-2} . Такое согласие характеризует общий масштаб теплового баланса.

В третьей главе «Параметризации молекулярного поглощения для длинноволновой радиации» построена параметризация газового поглощения теплового излучения в атмосфере Венеры для диапазона $10\text{--}6000 \text{ см}^{-1}$. Параметризация строится flux-fitting k -distribution методом по эталонным расчётам, настроенным для теплового излучения. Представленные результаты основаны на работе [37].

Результат. Диапазон $10\text{--}6000 \text{ см}^{-1}$, охватывающий основную часть собственного теплового излучения нижней и средней атмосферы, разделён на 16 спектральных интервалов. Для каждого интервала параметризация включает профили эффективных коэффициентов поглощения, отвечающие им интегралы функции Планка по тем же спектральным подмножествам и репрезентативное волновое число для облачной оптики. Параметризация задаёт газовое поглощение и сопутствующие радиационные входные величины, сохраняя возможность использовать выбранный численный метод решения уравнения переноса излучения. Более подробная сводка по построенной параметризации приведена в табл. 2. Большинство интервалов описывается одним или двумя k -членами. Наибольшее их число требуется в интервалах $600\text{--}760$ и $900\text{--}1100 \text{ см}^{-1}$: соответственно десять и пять. Первая область включает сильную 15-мкм полосу CO_2 , вторая связана с полосами вблизи 10.4 и 9.4 мкм. Структура поглощения в этих областях заметно влияет на интегральные потоки и охлаждение. Водяной пар доминирует в низкочастотной части диапазона и в отдельных других интервалах. Отсутствие SO_2 в столбце доминирующего поглотителя не означает исключения его вклада: он входит в суммарный коэффициент как один из дополнительных газов согласно выражению (9). Суммарно для описания всего длинноволнового диапазона требуется 32 решения уравнения переноса на атмосферный столбец. Подготовка этих данных по заданному атмосферному

Таблица 2: Параметры параметризации для длинноволновой области, полученной с использованием flux-fitting k -distribution метода

№	Интервал, см^{-1}	Газ	$\tilde{\nu}_i^{\text{eld}}$, см^{-1}	N_i
1	10–200	H ₂ O	100	2
2	200–400	H ₂ O	300	2
3	400–500	CO ₂	450	1
4	500–600	CO ₂	550	1
5	600–760	CO ₂	680	10
6	760–900	CO ₂	830	2
7	900–1100	CO ₂	1000	5
8	1100–1210	CO ₂	1150	1
9	1210–1300	CO ₂	1250	1
10	1300–1400	CO ₂	1350	1
11	1400–1800	H ₂ O	1600	1
12	1800–2650	CO ₂	2000	1
13	2650–3000	CO ₂	2800	1
14	3000–4100	CO ₂	3500	1
15	4100–4400	H ₂ O	4300	1
16	4400–6000	CO ₂	5000	1
Всего $n = 16$				32

столбцу реализована в открытом модуле FKDMVenusLW¹, оформленном как проект Fortran Package Manager: по профилям давления, температуры и концентраций поглотителей он выдаёт эффективные коэффициенты и интегралы функции Планка в форме, пригодной для передачи в радиационный блок.

Конфигурация эталонных расчётов. Эталонные потоки и скорости охлаждения рассчитывались описанной выше моделью Монте-Карло на спектральной сетке с шагом $1/2048 \text{ см}^{-1}$. Для построения и проверки использованы три температурных профиля (рис. 5): низкоширотный ночной профиль по данным [39], профиль VIRА-1 ночной стороны на широте 75° и составной дневной профиль, сочетающий VIRА-2 для широты 75° на высотах 50–100 км с VIRА-1 ниже 50 км [40; 41]; эти варианты задают рассмотренный диапазон температурных условий. Учитывались три основных поглотителя: CO₂ с постоянной объёмной долей 0.965, H₂O с содержанием 32.5 ppmv ниже 50 км и 3 ppmv вблизи верхней границы облаков и выше, а также SO₂ по работе [2] — однородная смесь около 150 ppmv ниже 50 км и высотная зависимость из той же модели выше; малые примеси CO, OCS, HCl и HF не включались в построение параметризации, поскольку их влияние на интегральные потоки и охлаждение оказалось пренебрежимо малым. Для CO₂ и H₂O применялись списки линий HITEMP, для SO₂ — HITRAN2020; дальние крылья CO₂ описывались суб-лоренцевской поправкой Тонкова [29] с обрезанием линий на расстоянии 250 см^{-1} от центра; селекция линий по интенсивности не применялась. Отдельный добавочный континуум не учитывался. Для описания

¹<https://github.com/Razumovskyy/Venus-longwave-fkd>

облачных свойств была использована четырёхмодовая облачная модель с высотными концентрациями частиц по работе [2], а облачные свойства в параметризованном расчёте задавались в точках табл. 2.

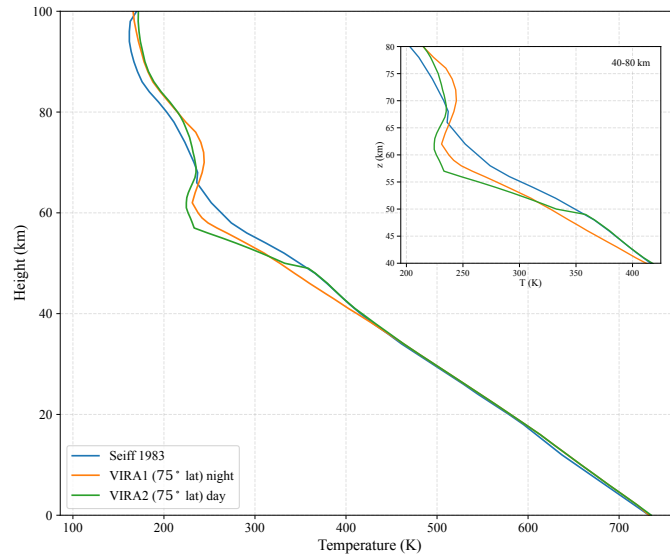


Рис. 5: Репрезентативные температурные профили атмосферы Венеры, использованные при построении и анализе чувствительности параметризации для длинноволновой области. Воспроизведено из Fomin, Razumovskiy [37].

Температурная зависимость. Полученные параметризации, вообще говоря, наследуют зависимость исходных сечений от выбранного профиля давления и температуры. Для большинства интервалов различия эффективных сечений при рассмотренных профилях оказались достаточно малыми для использования базового профиля. В интервалах 600–760 и 760–900 см^{-1} вводится явная температурная поправка:

$$\Lambda(T(w)) = \Lambda^*(T^*(w)) + \alpha(w) \frac{T(w) - T^*(w)}{T^*(w)}. \quad (13)$$

Здесь $\Lambda = \ln \sigma_{\text{eff}}$, $w = \ln p$, $T^*(w)$ — базовый температурный профиль, а функция $\alpha(w)$ определяется по численным экспериментам с различными профилями $T(p)$. Параметризация хранит базовые эффективные сечения и информацию для их пересчёта при изменении температуры. Это позволяет готовить эффективные коэффициенты поглощения для нового атмосферного столбца без повторения полного line-by-line расчёта на каждом шаге климатической модели.

Точность и область применения. Проверка проводилась по восходящим потокам и скоростям радиационного охлаждения для рассмотренных температурных профилей. Результаты показаны на рис. 6. Для восходящих тепловых потоков относительные расхождения с эталоном составляют менее 2 % ниже 95 км. Расхождения скоростей охлаждения не превышают примерно 1.5 К сут^{-1} ниже 95 км, 1.2 К сут^{-1} ниже 90 км и 0.3 К сут^{-1} ниже 75 км. Эти оценки характеризуют параметризацию относительно принятой физической конфигурации эталона. Профили коэффициентов строились и проверялись при фиксированных

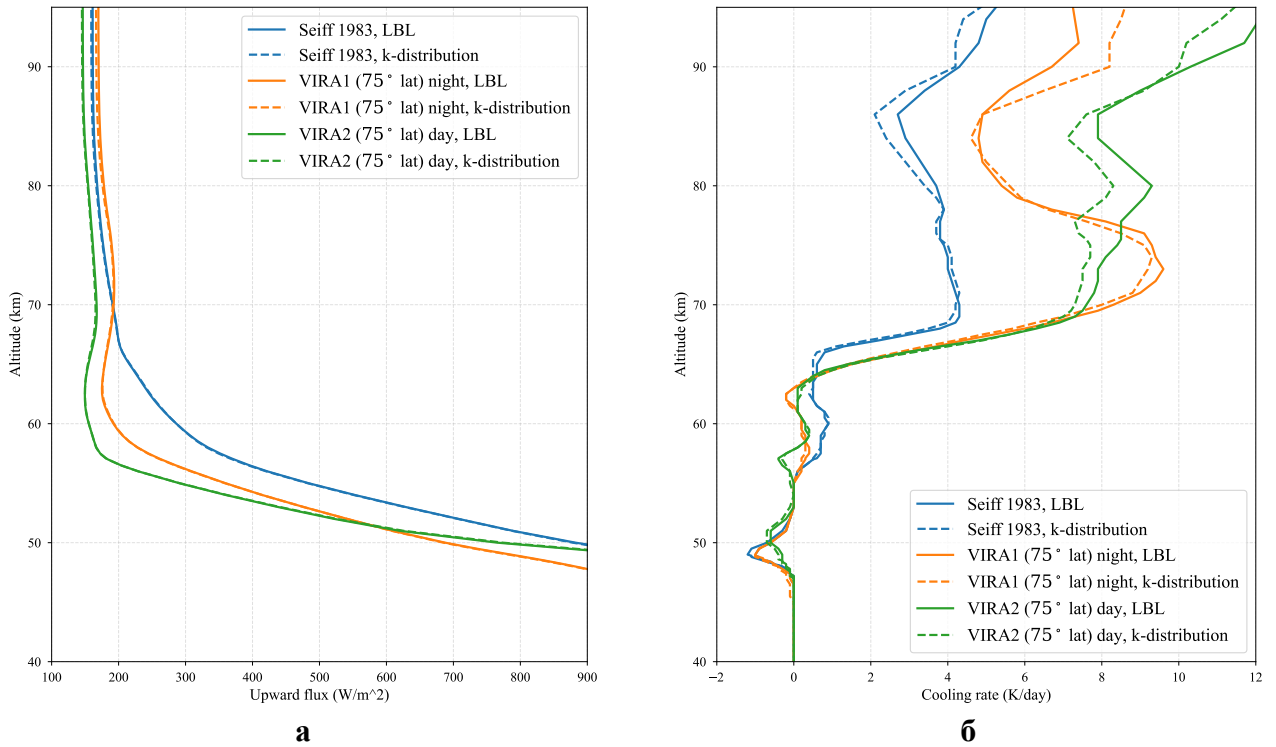


Рис. 6: Валидация параметризации для длинноволновой области, полученной с использованием flux-fitting k -distribution метода, по сравнению с эталонной line-by-line моделью Монте-Карло: а — вертикальные профили восходящих радиационных потоков; б — профили скоростей радиационного охлаждения. Пунктирные линии соответствуют параметризации, сплошные линии — эталонной модели. Воспроизведено из Fomin, Razumovskiy [37].

профилях отношений смеси газов. Проверенная область применения ограничена рассмотренным интервалом температурных условий; параметризация ожидается надёжной для реалистичных условий Венеры ниже 90 км. При изменении состава существенным условием остаётся сохранение доминирующего поглотителя в каждом спектральном интервале.

Сравнение с методом k -корреляций. Количество 32 k -членов определяет эффективность данной параметризации при использовании в радиационных блоках моделей общей циркуляции. В приведённых расчётах методом k -корреляций число спектральных решений больше примерно в 172 раза для схемы Lee и соавторов [5] и в 2.8–3.7 раза для двух вариантов Takahashi и соавторов [7]. Фактическое ускорение радиационного блока может также определяться выбранным методом решения уравнения переноса, вертикальной сеткой, облачной моделью и организацией вычислений.

В четвёртой главе «Параметризации молекулярного поглощения для солнечной радиации» рассмотрено построение параметризаций поглощения солнечного излучения в диапазоне $2030\text{--}80000\text{ см}^{-1}$. Представленные результаты основаны на работе [42]. Этот диапазон разделён на две области, к каждой из которых flux-fitting k -distribution метод применяется самостоятельно: коротковолновую $2030\text{--}15000\text{ см}^{-1}$ и ультрафиолетовую $25000\text{--}80000\text{ см}^{-1}$, которой соответствуют длины волн $125\text{--}400\text{ нм}$. В промежуточной области $15000\text{--}25000\text{ см}^{-1}$ газовое поглощение даёт пренебрежимо малый вклад в интегральный поток, несмотря на большой приходящий солнечный поток в

этой области, поэтому параметризация для неё не строится и достаточно учитывать только рассеяние. Рассматриваемые области различаются исходными спектральными данными: в ультрафиолетовой области поглощение задаётся измеренными сечениями фотопоглощения, коротковолновое — детальными спектрами молекулярных линий.

Эффективные сечения в УФ-диапазоне. Диапазон 125–400 нм разделён на 8 интервалов, каждый из которых описывается одним k -членом и соответственно одним решением уравнения переноса. Границы соответствующих разбиений выбраны по анализу точности потоков и нагревов. Эффективное сечение газа задаётся через количество молекул поглотителя вдоль прямого солнечного луча от верхней границы атмосферы ζ . Такая переменная учитывает изменение оптического пути с солнечным зенитным углом и позволяет применять построенные параметризации при разных солнечных геометриях. Параметры ультрафиолетовых интервалов приведены в табл. 3 вместе с коротковолновыми: границы, основные поглотители, репрезентативные волновые числа и падающий солнечный поток на верхней границе атмосферы. В столбце поглотителей наиболее существенный компонент указан первым. В дальнем УФ доминирует CO_2 , в среднем важен SO_2 , а в ближнем возрастает роль неизвестного УФ-поглотителя (UVA). Рэлеевское рассеяние и облачные свойства в параметризованном расчёте задаются в репрезентативных спектральных точках. Эффективное сечение $\sigma_{\text{eff}}(\zeta)$ отражает усреднение исходного поглощения по солнечному спектру, достигшему данного уровня: при малом количестве поглотителя вдоль луча ζ в переносе участвует почти весь спектральный интервал и сечение близко к среднему по падающему излучению, а с ростом ζ участки с сильным поглощением становятся непрозрачными, оставшийся поток сосредоточивается в областях слабого поглощения и σ_{eff} убывает. Перегибы кривых на рис. 7 отвечают последовательному исключению из переносимого потока групп спектральных участков с различной силой поглощения. Поскольку аргументом служит количество поглотителя, а не высота или давление, такие таблицы применимы при разных атмосферных профилях и разных численных схемах решения уравнения переноса излучения.

В основной параметризации для УФ-диапазона температурная зависимость сечений не учитывалась. Это предположение проверено для CO_2 в дальнем УФ с использованием измерений при 195 и 295 К [43] совместно с данными [44]. Линейная интерполяция между температурами дала различия нагрева менее 1 %.

Конфигурация эталонных расчётов в УФ-диапазоне. Эталонные расчёты охватывают 25000–80000 см^{-1} (125–400 нм) и ведутся на спектральной сетке с шагом 0.25 см^{-1} ; поскольку поглощение задаётся гладкими измеренными сечениями, а не контурами отдельных линий, более подробная сетка не требуется. Ультрафиолет составляет сравнительно малую долю поступающей солнечной энергии, но существенно влияет на верхнюю атмосферу, фотохимию и нагрев

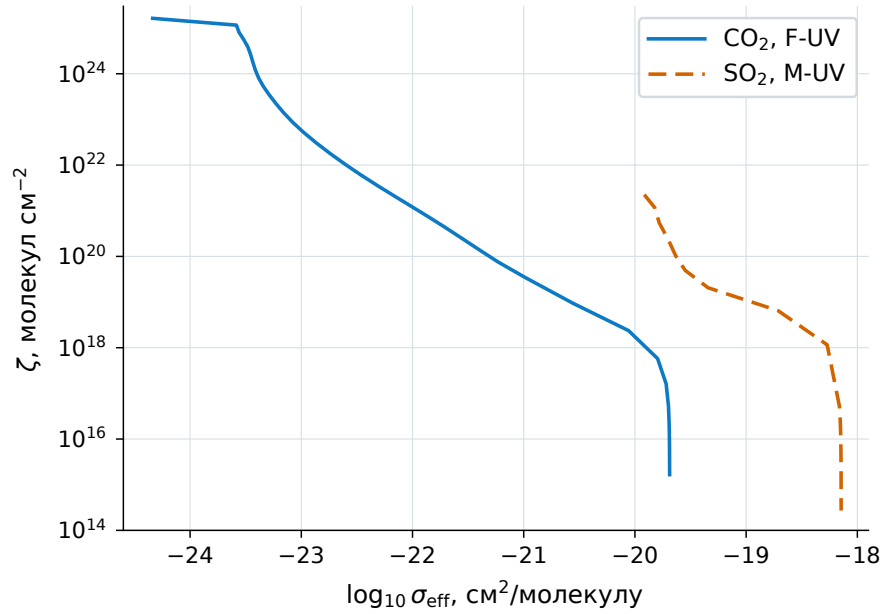


Рис. 7: Эффективные сечения CO_2 в интервале F-UV и SO_2 в интервале M-UV. Построено по данным Fomin, Razumovskiy [42].

облачного слоя. Поглощение CO_2 , SO_2 и неизвестным УФ-поглотителем перераспределяет энергию в облаках и выше них. Исходные сечения взяты из спектрального атласа MPI-Mainz [45] и исходных публикаций с результатами лабораторных измерений, поэтому line-by-line суммирование не требуется. Сечения приведены к единому представлению в cm^2 на молекулу. Для CO_2 использованы данные [43; 44; 46] в разных частях УФ-диапазона. Неизвестный УФ-поглотитель задаётся отдельным поглощающим компонентом с профилем концентрации и модельным сечением из работы [2], и для него также строятся эффективные сечения. Температура задаётся ночным экваториальным профилем VIRА. Использован солнечный спектр COSI [47; 48]. Содержание CO_2 принято равным 0.965 по всему столбцу. Для SO_2 использованы профиль [2] с содержанием около 150 ppmv ниже облаков и альтернативный вариант по данным [49] ниже облаков и модели [50] выше них. Для водяного пара заданы 32.5 ppmv ниже 50 км и 3 ppmv выше 70 км. Для неизвестного УФ-поглотителя сравниваются модели high-altitude и low-altitude из [2], различающиеся положением поглощающего слоя; каждой отвечает своё спектральное сечение и вертикальный профиль концентрации. Вариации профилей SO_2 и неизвестного поглотителя позволяют проверить параметризацию при изменении компонентов, наиболее существенных для ближнего УФ.

Проверка параметризации для УФ-диапазона. Сравнивались нисходящие и восходящие потоки и скорости нагрева в эталонных расчётах на подробной спектральной сетке и в модели с параметризованным поглощением. Проверка

выполнена при двух профилях SO_2 и солнечном зенитном угле 0° . В обоих случаях профиль неизвестного УФ-поглотителя фиксирован и соответствует модели high-altitude из той же работы. Отдельно проверялось изменение его высотного распределения при фиксированном профиле SO_2 ; этот тест выполнен в диапазоне 300–400 нм, где вклад неизвестного поглотителя особенно важен. Анализ отдельных газов показал, что основной интегральный эффект определяется CO_2 , SO_2 и неизвестным УФ-поглотителем, а вклады остальных составляющих в поглощение несут незначительный вклад. Устойчивость по скоростям нагрева проверена также ниже 100 км для углов 0° и 75° , при профилях SO_2 и неизвестного поглотителя из [2]. В рассмотренных тестах для УФ-диапазона расхождения составляют менее 3 % для потоков и менее 1 % для скоростей нагрева. Эти оценки относятся к параметризации при заданной модели поглощения, включая описание неизвестного компонента. Они показывают, что восемь решений уравнения переноса воспроизводят проверенные радиационные величины в рамках данной точности.

Полученные эффективные сечения опубликованы в Mendeley Data². Данные организованы по интервалам; первая колонка таблиц задаёт ζ в см^{-2} , вторая — σ_{eff} в см^2 . Представление не привязано непосредственно к высоте или давлению и допускает использование с различными численными схемами решения уравнения переноса.

Параметризация в области 2030–15000 см^{-1} . В данной области учитываются молекулярные линии, а поглощение солнечного излучения взаимодействует с молекулярным и облачным рассеянием. При подготовке line-by-line спектров использованы χ -факторы из работы [10]: граница обрезания крыльев линий от центра — $\pm 1500 \text{ см}^{-1}$. Остальные параметры соответствуют эталонной модели, описанной выше. Итоговая параметризация для этого диапазона содержит 11 интервалов и 38 k -членов (интервалы 1–11 в табл. 3). В большинстве интервалов доминирует CO_2 ; в области 12850–15000 см^{-1} существенен вклад H_2O . Для принятой атмосферной конфигурации выполнено сопоставление восходящих и нисходящих потоков и нагревов с эталонными line-by-line расчётами с учётом облаков и рассеяния. На рис. 8 показаны обе группы величин, характеризующие перенос энергии через атмосферный столбец и её высотное перераспределение. Ошибки в восходящих потоках в области 2030–15000 см^{-1} составили менее 2%.

Полученные параметризации для УФ-диапазона и коротковолновой области дополняют параметризацию для теплового излучения из третьей главы. Вместе они дают компактные наборы эффективного поглощения для радиационных блоков Венеры при раздельном задании спектроскопических данных, облачных свойств и источников излучения для соответствующих диапазонов.

²<https://doi.org/10.17632/97rskzggbj.1>

Таблица 3: Параметры параметризаций поглощения солнечного излучения.

Интервал (число k -членов)	Границы интервала, см^{-1}	Основные поглощители	$\tilde{\nu}_i^{\text{eld}}, \text{см}^{-1}$	Солнечный поток на ТОО в k -членах, Вт м^{-2}
1 (1)	2030–2250	CO_2	2040	4.25
2 (6)	2250–2400	CO_2	2300	0.72, 0.77, 1.74, 0.206, 8.87×10^{-4} , 2.44×10^{-2}
3 (1)	2400–2750	CO_2	2600	9.93
4 (1)	2750–3250	CO_2	3000	18.82
5 (3)	3250–4200	CO_2	3800	46.83, 4.32, 0.34
6 (5)	4200–5150	CO_2	4210	12.31, 27.42, 21.71, 14.59, 8.86×10^{-2}
7 (5)	5150–6430	CO_2	6420	34.47, 84.63, 20.92, 3.09, 4.96×10^{-2}
8 (5)	6430–7700	CO_2	7690	72.71, 54.47, 12.35, 9.57, 16.67
9 (5)	7700–10280	CO_2	8000	152.92, 119.56, 70.88, 17.47, 1.82
10 (3)	10280–12850	CO_2	12700	300.27, 53.72, 11.412
11 (3)	12850–15000	H_2O	14700	205.90, 83.26, 2.00
12 (1)	25000–25500	UVA, SO_2	25250	47.27
13 (1)	25500–27000	UVA, SO_2	26250	17.64
14 (1)	27000–29000	UVA, SO_2	28000	52.40
15 (1)	29000–30000	UVA, SO_2	30000	20.20
16 (1)	30000–31000	SO_2 , UVA	30000	19.91
17 (1)	31000–33333	SO_2 , UVA	32000	28.19
18 (1)	33333–50000	SO_2 , CO_2	36000	27.74
19 (1)	50000–80000	CO_2	66000	0.20

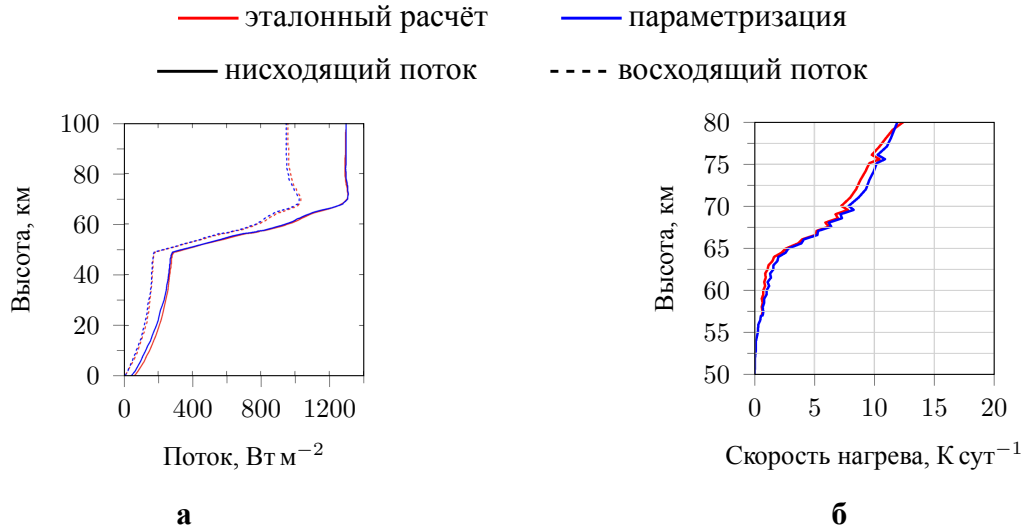


Рис. 8: Валидация параметризации для коротковолновой области, построенной с использованием flux-fitting k -distribution метода: а — нисходящие и восходящие потоки в интервале 2030–15000 см^{-1} ; б — радиационные нагревы.

Заключение

В представленной диссертационной работе решалась задача построения эффективных параметризаций газового поглощения для расчётов переноса излучения в атмосфере Венеры. Исходная мотивация связана с проблемой самосогласованного расчёта радиации в моделях общей циркуляции: радиационные

потоки и скорости нагрева должны вычисляться по текущему состоянию атмосферы — профилям температуры, газовому составу и облачности, обновляемым в ходе интегрирования, — а не браться из заранее подготовленного отклика. Такой расчёт упирается в вычислительную стоимость: интегральные потоки и скорости нагрева или охлаждения определяются суммированием по молекулярному спектру, содержащему миллионы линий, тогда как радиационный блок вызывается для тысяч атмосферных столбцов на каждом радиационном шаге. Основные результаты работы состоят в следующем.

1. Разработан программный инструмент MARFA для эффективного line-by-line расчёта сечений и коэффициентов молекулярного поглощения сразу для всего атмосферного профиля. Многосеточная интерполяционная техника, лежащая в основе данного инструмента, сокращает число прямых вычислений профилей линий, включая их протяжённые крылья, а каталог линий, форма контура, поправки к крыльям и границы обрезания изменяются независимо, что позволяет исследовать чувствительность спектров к этим предположениям и пересчитывать исходные данные параметризаций.
2. Flux-fitting k -distribution метод выделен и сформулирован как самостоятельная процедура построения параметризации, результат которой пригоден для произвольных методов решения уравнения переноса излучения. Эффективное поглощение восстанавливается по эталонным потокам, контроль потоков и скоростей нагрева или охлаждения встроен в процедуру построения k -членов, а предположение о сохранении ранговой корреляции спектров по высоте, как в стандартном методе k -корреляций, не требуется. Эталонная модель на основе метода Монте-Карло с многократным рассеянием адаптирована к условиям Венеры.
3. Для теплового диапазона $10\text{--}6000\text{ см}^{-1}$ построена параметризация поглощения CO_2 , H_2O и SO_2 , включающая 16 спектральных интервалов и 32 k -члена. Расхождения восходящих потоков с эталоном составляют менее 2 % ниже 95 км, расхождения скоростей охлаждения не превышают примерно 1.2 К сут^{-1} ниже 90 км и 0.3 К сут^{-1} ниже 75 км. Подготовка входных данных радиационного блока реализована в открытом Fortran-драйвере FKDMVenusLW.
4. Для солнечного излучения в диапазоне $2030\text{--}80000\text{ см}^{-1}$ построены параметризации, включающие в сумме 19 спектральных интервалов и 46 k -членов: 11 интервалов и 38 k -членов в коротковолновой области $2030\text{--}15000\text{ см}^{-1}$ и 8 интервалов по одному k -члену в каждом в ультрафиолетовом диапазоне $125\text{--}400\text{ нм}$. В рассмотренных тестах для УФ-диапазона расхождения с эталонными расчётами составляют менее 3 % для потоков и менее 1 % для скоростей нагрева. Поглощение в видимой области $15000\text{--}25000\text{ см}^{-1}$ даёт пренебрежимо малый вклад в интегральный поток, поэтому параметризации не требует.

Вычислительный итог работы состоит в том, что полный радиационный расчёт для атмосферного столбца Венеры — тепловой и солнечный — требует 78 решений уравнения переноса излучения: 32 в диапазоне $10\text{--}6000\text{ см}^{-1}$ и 46 в диапазоне $2030\text{--}80000\text{ см}^{-1}$. Для теплового диапазона это в несколько раз, а по сравнению с наиболее подробными схемами метода k -корреляций — более чем на порядок меньше; фактическое ускорение радиационного блока зависит также от выбранного метода решения уравнения переноса и организации расчётов.

Наборы k -членов для теплового и солнечного излучения независимы и могут подключаться к радиационному блоку по отдельности; в пределах каждого набора число k -членов фиксировано и сокращению без перестроения не подлежит. Рэлеевское рассеяние и оптические свойства облаков для каждого спектрального интервала следует рассчитывать в представленных репрезентативных спектральных точках, указанных вместе с коэффициентами поглощения. Применение параметризаций за пределами проверенных температурных профилей и газового состава требует дополнительной проверки, а при существенном изменении условий — перестроения эффективного поглощения по описанной процедуре; ключевым условием остаётся сохранение доминирующего поглотителя в каждом спектральном интервале.

Перспективы дальнейших работ по данной тематике связаны с включением полученных наборов в радиационные блоки моделей общей циркуляции и дальнейшей проверкой их поведения в климатических расчётах; с расширением области применимости описанной группы методов на более широкий набор температурных профилей и газовых составов, включая атмосферы экзопланет, для которых Венера служит физическим аналогом; а также с переходом к более самосогласованному описанию спектроскопии — единой модели, совместно описывающей контуры линий, поправки к их крыльям и континуальное поглощение для смесей с преобладанием CO_2 .

Публикации автора по теме диссертации

1. *Fomin B. A., Razumovskiy M. V.* The flux-fitting k -distribution technique: An application to thermal infrared absorption in the atmosphere of Venus // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2026. — Article 109912.
2. *Razumovskiy M. V., Fomin B. A., Astanin D. A.* MARFA: An effective line-by-line tool for calculating molecular absorption in planetary atmospheres // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2025. — Vol. 346. — Article 109599.
3. *Fomin B. A., Razumovskiy M. V.* Effective parameterization of absorption by gaseous species and unknown UV absorber in 125–400 nm region of Venus

atmosphere // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. — 2022. — Vol. 286. — Article 108201.

4. *Разумовский М. В., Родин А. В.* Моделирование атмосфер гравитационно-захваченных супер-Земель, вращающихся вокруг маломассивных родительских звезд, с использованием негидростатической модели общей циркуляции // Письма в Астрономический журнал. — 2020. — Т. 46, № 6. — С. 427–434.
5. *Фомин Б. А., Разумовский М. В.* Моделирование переноса тепловой радиации в атмосфере Венеры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : материалы 21-й Международной конференции. — Москва : ИКИ РАН, 2023. — С. 441.
6. *Razumovskiy M. V., Fomin B. A., Rodin A. V.* Development of radiation block for a nonhydrostatic GCM of the Venus atmosphere // The Eleventh Moscow Solar System Symposium. — 2020. — P. 371.

Список литературы

1. *Titov D. V., Bullock M. A., Crisp D.* [et al.]. Radiation in the atmosphere of Venus // Geophysical Monograph-American Geophysical Union. — 2007. — Т. 176. — С. 121–138.
2. *Haus R., Kappel D., Arnold G.* Radiative heating and cooling in the middle and lower atmosphere of Venus and responses to atmospheric and spectroscopic parameter variations // Planetary and Space Science. — 2015. — Т. 117. — С. 262–294.
3. *Lebonnois S., Hourdin F., Eymet V.* [et al.]. Superrotation of Venus' atmosphere analyzed with a full general circulation model // Journal of Geophysical Research: Planets. — 2010. — Т. 115, E6. — E06006.
4. *Sugimoto N., Fujisawa Y., Komori N.* [et al.]. Super-rotation independent of horizontal diffusion reproduced in a Venus GCM // Earth, Planets and Space. — 2023. — Т. 75, № 1. — С. 44.
5. *Lee C., Richardson M. I.* A Discrete Ordinate, Multiple Scattering, Radiative Transfer Model of the Venus Atmosphere from 0.1 to 260 μm // Journal of the atmospheric sciences. — 2011. — Т. 68, № 6. — С. 1323–1339.
6. *Mendonça J., Read P., Wilson C.* [et al.]. A new, fast and flexible radiative transfer method for Venus general circulation models // Planetary and Space Science. — 2015. — Т. 105. — С. 80–93.
7. *Takahashi Y. O., Hayashi Y.-Y., Hashimoto G. L.* [et al.]. Development of a line-by-line and a correlated k-distribution radiation models for planetary atmospheres // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. — 2023. — Т. 101, № 1. — С. 39–66.

8. *Lebonnois S., Eymet V., Lee C.* [et al.]. Analysis of the radiative budget of the Venusian atmosphere based on infrared Net Exchange Rate formalism // *Journal of Geophysical Research: Planets.* — 2015. — T. 120, № 6. — C. 1186—1200.
9. *Shao W. D., Mendonça J. M., Dai L.* Three-Dimensional Venus Cloud Structure Simulated by a General Circulation Model // *Journal of Geophysical Research: Planets.* — 2024. — T. 129. — e2023JE008088.
10. *Chaverot G., Turbet M., Tran H.* [et al.]. SpeCT: A state-of-the-art tool to calculate correlated- k tables and continua of CO₂-H₂O-N₂ gas mixtures // *Astronomy & Astrophysics.* — 2025. — T. 702. — A137.
11. *Kane S. R., Kopparapu R. K., Domagal-Goldman S. D.* On the frequency of potential Venus analogs from Kepler data // *The Astrophysical Journal Letters.* — 2014. — T. 794, № 1. — C. L5.
12. *Kane S. R., Byrne P. K., Fauchez T. J.* [et al.]. Venus as an anchor point for planetary habitability // *Nature Astronomy.* — 2024. — T. 8. — C. 417—424.
13. *Eymet V., Fournier R., Dufresne J.-L.* [et al.]. Net exchange parameterization of thermal infrared radiative transfer in Venus' atmosphere // *Journal of Geophysical Research: Planets.* — 2009. — T. 114, E11.
14. *Haus R., Kappel D., Arnold G.* Radiative energy balance of Venus: An approach to parameterize thermal cooling and solar heating rates // *Icarus.* — 2017. — T. 284. — C. 216—232.
15. *Gordon I. E., Rothman L. S., Hargreaves R. J.* [et al.]. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2022. — ЯНВ. — T. 277. — C. 107949.
16. *Rothman L. S., Gordon I., Barber R.* [et al.]. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2010. — ОКТ. — T. 111, № 15. — C. 2139—2150.
17. *Huang X., Gamache R. R., Freedman R. S.* [et al.]. Reliable infrared line lists for 13 CO₂ isotopologues up to $E' = 18,000 \text{ cm}^{-1}$ and 1500 K, with line shape parameters // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2014. — T. 147. — C. 134—144.
18. *Barber R. J., Tennyson J., Harris G. J.* [et al.]. A high-accuracy computed water line list // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2006. — T. 368, № 3. — C. 1087—1094.
19. *Kochanov R. V., Gordon I., Rothman L.* [et al.]. HITRAN Application Programming Interface (HAPI): A comprehensive approach to working with spectroscopic data // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2016. — T. 177. — C. 15—30.

20. *Yurchenko S. N., Al-Refaie A. F., Tennyson J.* ExoCross: a general program for generating spectra from molecular line lists // *Astronomy & Astrophysics*. — 2018. — T. 614. — A131.
21. *Pannier E., Laux C. O.* RADIS: A nonequilibrium line-by-line radiative code for CO₂ and HITRAN-like database species // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2019. — T. 222/223. — C. 12—25.
22. *Grimm S. L., Malik M., Kitzmann D.* [et al.]. HELIOS-K 2.0 Opacity Calculator and Open-source Opacity Database for Exoplanetary Atmospheres // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2021. — T. 253, № 1. — C. 30.
23. *Mendonça J. M., Read P. L.* Exploring the Venus global super-rotation using a comprehensive general circulation model // *Planetary and Space Science*. — 2016. — T. 134. — C. 1—18.
24. *Tahseen T. P., Mendonça J. M., Yip K. H.* [et al.]. Enhancing 3D planetary atmosphere simulations with a surrogate radiative transfer model // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2024. — T. 535, № 3. — C. 2210—2227.
25. *Fu Q., Liou K.* On the correlated k -distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres // *Journal of Atmospheric Sciences*. — 1992. — T. 49, № 22. — C. 2139—2156.
26. *Pincus R., Mlawer E. J., Delamere J. S.* Balancing accuracy, efficiency, and flexibility in radiation calculations for dynamical models // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. — 2019. — T. 11, № 10. — C. 3074—3089.
27. *Tennyson J., Yurchenko S. N., Zhang J.* [et al.]. The 2024 release of the ExoMol database: Molecular line lists for exoplanet and other hot atmospheres // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2024. — T. 326. — arXiv: 2406.06347 [astro-ph.GA].
28. *Perrin M., Hartmann J.* Temperature-dependent measurements and modeling of absorption by CO₂-N₂ mixtures in the far line-wings of the 4.3 μ m CO₂ band // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 1989. — T. 42, № 4. — C. 311—317.
29. *Tonkov M., Filippov N., Bertsev V.* [et al.]. Measurements and empirical modeling of pure CO₂ absorption in the 2.3- μ m region at room temperature: far wings, allowed and collision-induced bands // *Applied Optics*. — 1996. — T. 35, № 24. — C. 4863—4870.
30. *Razumovskiy M. V., Rodin A. V.* Modeling the Atmospheres of Tidally Locked Super-Earths Orbiting Low-Mass Host Stars Using a Nonhydrostatic General Circulation Model // *Astronomy Letters*. — 2020. — T. 46, № 6. — C. 400—406.

31. *Fomin B.* Effective interpolation technique for line-by-line calculations of radiation absorption in gases // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 1995. — T. 53, № 6. — C. 663—669.
32. *Fomin B. A., Mazin I. P.* Model for an investigation of radiative transfer in cloudy atmosphere // *Atmospheric Research.* — 1998. — T. 47/48. — C. 127—153.
33. *Fomin B.* Monte-Carlo algorithm for line-by-line calculations of thermal radiation in multiple scattering layered atmospheres // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2006. — T. 98, № 1. — C. 107—115.
34. *Fomin B. A.* A k-distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 1. FKDM, fast k-distribution model for the longwave // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* — 2004. — T. 109, № 2. — C. 1—11.
35. *Fomin B., de Paula Correa M.* A k-distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 2. FKDM, fast k-distribution model for the shortwave // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.* — 2005. — T. 110, № 2. — C. 1—10.
36. *Razumovskiy M., Fomin B., Astanin D.* MARFA: An effective line-by-line tool for calculating molecular absorption in planetary atmospheres // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2025. — T. 346. — C. 109599.
37. *Fomin B. A., Razumovskiy M. V.* The flux-fitting k -distribution technique: An application to thermal infrared absorption in the atmosphere of Venus // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* — 2026. — C. 109912.
38. *Haus R., Kappel D., Tellmann S.* [et al.]. Radiative energy balance of Venus based on improved models of the middle and lower atmosphere // *Icarus.* — 2016. — T. 272. — C. 178—205.
39. *Seiff A.* Thermal Structure of the Atmosphere of Venus // *Venus* / под ред. D. M. Hunten, L. Colin, T. M. Donahue [et al.]. — Tucson : University of Arizona Press, 1983. — C. 215—279.
40. *Seiff A., Schofield J. T., Kliore A. J.* [et al.]. Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 kilometers altitude // *Advances in Space Research.* — 1985. — T. 5, вып. 11. — C. 3—58.
41. *Zasova L. V., Moroz V. I., Linkin V. M.* [et al.]. Structure of the Venusian atmosphere from surface up to 100 km // *Cosmic Research.* — 2006. — T. 44, № 4. — C. 364—383.

42. *Fomin B., Razumovskiy M.* Effective parameterization of absorption by gaseous species and unknown UV absorber in 125–400 nm region of Venus atmosphere // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 2022. — T. 286. — C. 108201.
43. *Parkinson W. H., Rufus J., Yoshino K.* Absolute absorption cross section measurements of CO₂ in the wavelength region 163–200 nm and the temperature dependence // *Chemical Physics*. — 2003. — T. 290, № 2/3. — C. 251—256.
44. *Yoshino K., Esmond J. R., Sun Y.* [et al.]. Absorption cross section measurements of carbon dioxide in the wavelength region 118.7–175.5 nm and the temperature dependence // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. — 1996. — T. 55, № 1. — C. 53—60.
45. *Keller-Rudek H., Moortgat G. K., Sander R.* [et al.]. The MPI-Mainz UV/VIS spectral atlas of gaseous molecules of atmospheric interest // *Earth System Science Data*. — 2013. — T. 5, № 2. — C. 365—373.
46. *Shemansky D.* CO₂ Extinction Coefficient 1700 – 3000 Å // *The Journal of Chemical Physics*. — 1972. — T. 56, № 4.
47. *Shapiro A. I., Schmutz W., Schoell M.* [et al.]. NLTE solar irradiance modeling with the COSI code // *Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — T. 517, № 6. — C. 1—13.
48. *Shapiro A. I., Schmutz W., Rozanov E.* [et al.]. A new approach to the long-term reconstruction of the solar irradiance leads to large historical solar forcing // *Astronomy and Astrophysics*. — 2011. — T. 529. — C. 1—8. — arXiv: 1102.4763.
49. *Vandaele A. C., Korabiev O., Belyaev D.* [et al.]. Sulfur dioxide in the Venus atmosphere: I. Vertical distribution and variability // *Icarus*. — 2017. — Окт. — T. 295. — C. 16—33.
50. *Zhang X., Liang M. C., Mills F. P.* [et al.]. Sulfur chemistry in the middle atmosphere of Venus // *Icarus*. — 2012. — T. 217, вып. 2. — C. 714—739.