

УДК 535.2;535.3;550.35;551.46;551.521

ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ С ПЕРИСТЫМИ ОБЛАКАМИ

© 2021 г. Т. А. Сушкевич^а, *, В. А. Фалалеева^б, **

^аИнститут прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Миусская пл., 4, Москва, 125047 Россия

^бИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

*e-mail: tamaras@keldysh.ru

**e-mail: victory@phystech.edu

Поступила в редакцию 11.12.2019 г.

После доработки 08.02.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

Теоретической основой дистанционного зондирования Земли из космоса и радиационного форсинга на климат является теория переноса излучения, базирующаяся на разных приближениях кинетических уравнений Больцмана. Предложена модель переноса солнечного излучения в облачной атмосфере “Fast Line-by-Line Model” (FLBLM), усовершенствованная с учетом высокого разрешения спектров поглощения в ИК-диапазоне, аэрозольного рассеяния и поглощения, поляризационных эффектов, гетерогенных и анизотропных сред. Модель FLBLM, ориентированная на локальные расчеты и экспресс-анализ, реализована методом статистического моделирования с использованием алгоритмов метода Монте-Карло. Проведен гиперспектральный расчет вектор-функции Стокса уходящего солнечного излучения для атмосферы с перистыми облаками над кучево-дождевыми облаками, который позволяет оценить влияние перистых облаков и их микрофизики на спектральную поляризацию. Для перистых облаков использованы модели с шестью независимыми параметрами в фазовой матрице для различных эффективных диаметров частиц от 10 до 120 мкм, а кучево-дождевые капельные облака описываются моделью с четырьмя независимыми параметрами и эффективным диаметром капель 62 мкм.

Ключевые слова: уравнение переноса излучения, поляризация, анизотропная среда, перистые облака, ледяные кристаллы, гетерогенная система, гиперспектральная модель, ИК-спектр, программа “Будущее Земли”

DOI: 10.31857/S000235152103010X

1. ВВЕДЕНИЕ

С 2014 г. мировое научное сообщество начало объединяться на платформе Всемирной Глобальной Научной Программы “Будущее Земли” (World Global Research Projects “Future Earth”) [1] для координации международных исследований по устойчивому развитию окружающей среды и общества. Это была совместная инициатива Международного совета по науке (ICSU) и Международного научного совета по общественным наукам (ISSC) при поддержке крупнейших международных правительственных организаций в сфере науки, образования и культуры – ЮНЕСКО, Программы Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП), Международного университета ООН, Международной метеорологической организации (WMO), Бельмонтским форумом, Сетью организаций по устойчивому развитию (SDSP) и др. После объединения в 2018 г. ICSU и ISSC переименованы в “Международный научный совет”

(ISC) [2], представляющий 133 страны, 29 международных научных союзов и 24 научные ассоциации. В 2018 г. к Программе присоединилась Россия в лице Российского национального Комитета Российской академии наук.

В Программу “Будущее Земли” вошло большинство международных программ по изучению глобальных изменений и климата, и с каждым годом увеличивается число проектов по широкому спектру тематических исследований в науках о Земле. Солнце – естественно-природный источник энергии и основа жизни на планете Земля. Однако в Программе и этих проектах недостаточное внимание уделяется “радиационным” задачам, т.е. исследованиям роли переноса “лучистой энергии” Солнца и радиационного воздействия на все сферы планеты – живые и неживые объекты природы, а также на человека. Планета Земля – сложнейшая динамическая система. Радиационное поле Земли мгновенно со скоростью света от-

кликается на все изменения в этой системе. Солнечная энергия играет значимую роль в круговороте веществ в природе, который происходит в течение всей истории развития Земли, и потоке энергии в био- и экосистемах.

Солнечное и собственное излучение – один из неотъемлемых факторов жизнеобеспечения человека, животного и растительного мира на Земле, а также одна из определяющих компонент земной экосистемы и биосферы, для поведения которых характерно взаимодействие отдельных компонент с проявлением синергизма (обратных связей, которые иногда приводят к взаимоусилению различных процессов). Поле солнечного излучения влияет на механизмы изменчивости (динамические процессы: циркуляция, конвекция, турбулентный перенос; радиационные и фотохимические процессы) геофизического, метеорологического, климатического состояния Земли, которые обладают сложными нелинейными связями, затрудняющими предсказание возможных эффектов, оценку их величины и значимости, с одной стороны. С другой стороны, электромагнитное излучение, регистрируемое разными средствами, является основным источником информации о строении и физических свойствах планетных атмосфер, поверхностей, океана, биосферы при консервативном дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ).

Глобальная Климатическая система Земли (КСЗ) должна охватывать не только такие “материальные” компоненты как атмосфера, включая облака, гидросфера (океан, моря, озера, реки), криосфера (поверхность суши, лед, снег) и биосфера, объединяющая все виды живого (фауна и флора), но и “нематериальное” *радиационное поле Земли*. “Материальные” и “нематериальная” компоненты КСЗ находятся в непрерывных причинно-следственных прямых и обратных связях. Изменения в “материальных” компонентах КСЗ мгновенно проявляются в изменениях радиационного поля, которые приводят к обратному отклику. Наиболее наглядно такой сложный природный процесс наблюдается в районе Арктики, где происходит перестройка региональной климатической системы и повышается температура. В значительной степени это связано с изменениями фазового состояния H_2O (вода, лед, снег, влажность воздуха, облака разного типа, включая перистые).

Исследования макро характеристик глобальной КСЗ в масштабах планеты проводятся преимущественно с использованием данных космических наблюдений и станций глобального мониторинга. Радиационное поле Земли – это электромагнитное излучение в диапазоне спектра длин волн от ультрафиолета до миллиметровых волн. Ультрафиолетовый и видимый, свето-

вой, диапазон – это солнечное коротковолновое излучение; инфракрасный и миллиметровый диапазоны – это солнечное и собственное длинноволновое излучение.

Непреодолимая трудность исследований этого физического поля в натуральных условиях обусловлена его непрерывной изменчивостью во времени и по пространству и невозможностью в момент измерений восстановить весь набор радиационно-активных компонент “оптической погоды” исследуемой среды, а следовательно, невозможно повторить эксперимент. Потому качественные и количественные оценки характеристик наблюдаемого радиационного поля носят статистический или прогностический характер. Фундаментальные основы методов обработки таких случайных полей заложены академиком Андреем Николаевичем Колмогоровым (25.04.1903–20.10.1987) и его учеником Александром Михайловичем Обуховым (05.05.1918–03.12.1989).

Солнечное и собственное излучение Земли и его взаимодействие с веществом определяют радиационное поле Земли и лежат в основе сопряженных задач экологии, климата, эволюции, мониторинга и дистанционного зондирования Земли, гиперспектрального подхода и нанодиагностики природных сред. Например, трансграничный перенос загрязнений в атмосфере после крупных пожаров, извержений вулканов, техногенных аварий или военных действий и т.п., которые влияют на экологию и состояние окружающей среды, может быть обнаружен методами ДЗЗ, а далее через перенос лучистой энергии, зависящей от загрязнителей сред, может влиять на климат и в конечном итоге на тренд эволюции Земли как планеты. Электромагнитное излучение – единое физическое поле – основа Мироздания в масштабах не только Земли, Солнечной системы, но и Вселенной. Первым потребителем прикладных аспектов электромагнитной сущности Мироздания стала метеорология. Основоположник русской метеорологии и агрометеорологии член-корреспондент Российской академии наук (1916) Петр Иванович Броунов (21.12.1852–24.04.1927) занялся изучением циклонов и антициклонов, прогнозом погоды и подошел к пониманию роли радиационной проблемы в начале XX века.

В 1925 г. Евграф Сергеевич Кузнецов (13.03.1901–17.02.1966), 120-летие со дня рождения которого отмечается в 2021 г., одним из первых начал исследования воздействия солнечного излучения и лучистой энергии на климат и урожайность сельскохозяйственных культур в Поволжье [3]. Первый отечественный специалист по теоретико-расчетным исследованиям радиационного фактора климата и переноса излучения в природных средах Е.С. Кузнецов создал Москов-

скую научную школу и в 1955 г. основал единственный в мире уникальный отдел “Кинетические уравнения” в Институте прикладной математики АН СССР (Институт Келдыша создан в 1953 г.), сотрудники которого совместно с его учениками и коллегами из Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН стали первыми участниками космических исследований и освоения космоса.

Покорение космического пространства и выход человека в космос явились определяющим стимулом существенного роста активности научных фундаментальных и прикладных исследований радиационного поля Земли. В 1955 г. началась подготовка первой Программы космических исследований. 2021 г. — это год 110-летия со дня рождения академика Мстислава Всеволодовича Келдыша (10.02.1911—24.06.1978) [4, 5], Главного Теоретика космонавтики и идеолога космических исследований. М.В. Келдыш выделил **две стратегические задачи: разведка и наблюдения Земли**, вокруг которых сформировались многие научно-исследовательские проекты, созданы новые институты и определилась новая — космическая — отрасль человеческой деятельности.

В двадцать первом веке двадцать первый год (2021) — это год Юрия Гагарина, Мстислава Келдыша и Сергея Королева. “Советский человек в Космосе!”, — эта новость облетела 12 апреля 1961 г. весь земной шар вслед за кораблем “Восток”. Полет Юрия Гагарина стал апофеозом советской космической программы. В год 50-летия полета первого землянина в космос 7 апреля 2011 г. Генеральная Ассамблея ООН приняла Резолюцию, в которой **“провозглашает 12 апреля Международным днем полета человека в космос”**.

2. РАДИАЦИОННЫЙ ФОРСИНГ

На Третьей Всемирной конференции по изменению климата [6], пожалуй, впервые сторонники антропогенного и естественно-природного влияния на климат всесторонне обсуждали генеральные проблемы на секции “Наука об изменении климата”. В конференции активное участие приняли российские ученые академики Кирилл Яковлевич Кондратьев (14.06.1920—01.05.2006), Гурий Иванович Марчук (08.06.1925—04.03.2013), Юрий Антонович Израэль (15.05.1930—23.01.2014), которые стояли у истоков становления наблюдений Земли из космоса и метеорологических спутников и были крупнейшими специалистами по “радиационным” проблемам. Они последовательно отстаивали свою позицию и предлагали расширить повестку исследований климата не только в интересах “Киотского протокола” и “парникового” эффекта CO_2 . В докладах говорили о радиационном воздей-

ствии разных факторов на КСЗ и необходимости количественных оценок этого воздействия.

В рамках Монреальского протокола “по озонной проблеме” (1987) для количественной оценки эксперты ввели понятие “озоноразрушающий потенциал”, который вычислялся на основе сложной математической модели, учитывающей фотохимические, радиационные и циркуляционные процессы в атмосфере. Для исследования “парникового эффекта” отдельных парниковых газов в рамках Киотского протокола (1997) использовали понятие “потенциал глобального потепления” (ПГП).

В 2006 г. предложили более универсальную оценку отклика радиационного поля Земли на возмущения разной природы [7]. Так для описания текущего радиационного состояния атмосферы стали использовать разность потоков коротковолнового и длинноволнового излучения на уровне тропопаузы — границы раздела между тропосферой и стратосферой. Эта разность (F) чутко реагирует на различные природные явления и катаклизмы, будь то крупные извержения вулкана или лесные пожары, усиление солнечной активности или массовый выброс в атмосферу парникового газа. Рассматривая разность величин F для возмущенного ($F_{\text{возм}}$) и невозмущенного ($F_{\text{невозм}}$) состояний атмосферы, получим DF — численную характеристику отклика атмосферы, называемую **“радиационным форсингом”** (от англ. forcing — воздействие). Его величина вычисляется с помощью сложных математических моделей, позволяющих рассчитать как концентрации парниковых газов в атмосфере, так и поглощение длинноволнового излучения каждым из газов. Положительный радиационный форсинг свидетельствует о нагреве атмосферы, а отрицательный — о ее выхолаживании [7, 8].

Концепция радиационного воздействия эволюционировала от первоначального предложения, называемого в настоящее время мгновенное радиационное воздействие, до других предложений, направленных на уточнение связи радиационного дисбаланса с глобальным потеплением (например, глобальной средней температурой поверхности). Понятие радиационного форсинга было введено в связи с необходимостью разделить эффекты воздействия различных радиационно-активных факторов, поскольку в натуральных измерениях радиационное поле является откликом на все факторы одновременно.

В отчете “Радиационные воздействия, IPCC, AR4, 2013” Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) расширили сферу приложений понятия “радиационный форсинг” и рекомендовали использовать для количественных оценок значимости разных климатообразующих факторов, зависящих от солнечного

и собственного излучения, в качестве характеристики глобальной КСЗ: “Радиационное воздействие — это мера влияния фактора на изменение баланса входящей и исходящей энергии на Земле... и является показателем важности фактора как потенциального механизма изменения климата”.

Радиационный форсинг оценивает относительную эффективность влияния или реальный вклад того или иного возмущения — концентрации парникового газа и/или аэрозоля, любого феномена естественно-природного (опустынивание земель, вулканы, таяние льдов в Арктике и Антарктике и т.п.) или антропогенного происхождения (пожары, загрязнения атмосферы, облаков, суши, океана, сокращение лесных массивов и т.п.) — в изменение радиационного режима отдельных компонент КСЗ (атмосфера, океан, суша) или глобальной КСЗ как планеты за исследуемый промежуток времени [8].

Радиационный форсинг в глобальной КСЗ — это изменение притока радиации (солнечной коротковолновой и длинноволновой лучистой энергии) **под влиянием радиационно-активных факторов**: альbedo и отражающие характеристики земной поверхности; облачность; океаны и моря; снежный и ледовый покров; загрязнения и газовый состав атмосферы; загрязнения и аэрозольный состав атмосферы; солнечная постоянная (соларный климат); спектральные характеристики рассеяния и поглощения компонент природной среды; изотропная и анизотропная (при осадках и низких температурах) среда; радиационно-конвективная фотохимия и фотолиз; оптико-метеорологическая “погода” (температура, давление, влажность); биофизические, биогеофизические и биогеохимические процессы, круговорот веществ в биосфере и экосистеме.

CO_2 , H_2O и океан — конкурирующие факторы радиационного форсинга на глобальный климат и эволюцию планеты. Радиационный фактор H_2O оценивать трудно не только из-за сложных спектров селективного и континуального поглощения, но и потому, что это единственная компонента КСЗ, которая представлена в разных фазовых состояниях (водяной пар, водяные капли, снежные или ледяные кристаллы), которые изменяются в зависимости от температуры в компонентах климатической системы.

Солнечное излучение поглощается и накапливается океаном, потом переизлучается в длинноволновый спектр, взаимодействует с парниковыми газами и нагревает атмосферу, повышает температуру воды в океане и усиливается парообразование, увеличивается облачность и возрастает отражение солнечного излучения облаками. Это сложнее для моделирования и пока недоступный для экспериментальных наблюдений

естественный радиационный процесс глобального масштаба, от которого зависит и будущее планеты. Для проверки подобных гипотез объяснения механизмов сложнейшего взаимодействия атмосферы с облаками и океана и их влияния на климат важно уметь моделировать образование облаков [9] и разделять вклады атмосферы и океана в суммарное поле уходящего излучения Земли, регистрируемого из космоса [10]. “Простая оптическая модель безоблачной и облачной атмосферы” представлена в статьях [11, 12].

3. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

С появлением больших компьютеров (первая ЭВМ “Стрела” установлена в Институте Келдыша в 1953 г.) в период становления космической эры и в настоящее время натурные эксперименты и наблюдения сопровождаются математическим моделированием при контролируемых входных данных моделей через коэффициенты уравнений, функции источника, граничные условия, что позволяет изучать влияние отдельных компонент или отдельных процессов на измеряемую яркость или потоки и притоки лучистой энергии. Лучистая энергия связана с температурой законом Стефана–Больцмана: Йозеф Стефан (24.03.1835–07.01.1893) нашел формулу экспериментально, а его ученик Людвиг Больцман (20.02.1844–05.09.1906) дал теоретическое обоснование. Для исследований спектральных структур радиационного поля, когда компоненты не являются “серым телом”, закон Стефана–Больцмана обобщен на случай селективных характеристик поглощения, экстинкции, инсоляции.

В теории переноса излучения и компьютерном моделировании фундаментальным является кинетическое уравнение Больцмана с “бинарными столкновениями”, из которого получают разные приближения в зависимости от приложений [3, 10–20]. В детерминированных подходах обычно используют краевую задачу для интегро-дифференциального уравнения переноса излучения и методы (численные и аналитические), которые позволяют рассчитывать пространственные и угловые распределения характеристик излучения в полном фазовом объеме [3, 10–18]. В стохастическом моделировании проводятся локальные расчеты (конечное число точек пространства и направлений распространения излучения) и предпочитается интегральная форма уравнения [19, 20]. При прямом статистическом моделировании можно применять либо интегро-дифференциальную, либо интегральную модель в зависимости от приложений, однако расчеты проводятся локальные.

Таблица 1. Количество линий для каждого газа в базе HITRAN-2016

Молекула	Сумма линий по всем изотопам
H ₂ O	313787
CO ₂	559874
O ₃	449570
N ₂ O	160287
CO	5381
CH ₄	450332
O ₂	14085
Всего	1953316

Первая информационно-математическая достаточно реалистичная сферическая модель глобального радиационного поля Земли была разработана 55 лет назад в 1966 г. [15]. Эта модель была использована для первых научных проектов наблюдения Земли из космоса и, в частности, для проекта навигации в советской “Лунной программе” и позволила впервые получить оценки глобального альбеда планеты Земля [18]. Спектральное альбеда планеты может служить индикатором глобального изменения климата и тренда эволюции Земли как планеты (Марс или Венера — что впереди?). Детерминированная глобальная сферическая модель переноса излучения [15, 17] — это из категории “большая” сложнейшая вычислительная задача даже на суперкомпьютерах, потому расчетно-теоретические исследования характеристик радиационного поля проводятся преимущественно с использованием метода прямого статистического моделирования и/или с помощью алгоритмов метода Монте-Карло [19, 20]. В современных моделях климата Земли для радиационных блоков и в России, и за рубежом используются приближенные подходы, погрешность применимости которых невозможно оценить, но можно оценить значимость радиационного воздействия отдельных компонент на климатическую систему в целом.

Теория переноса излучения лежит в основе описания радиационного поля Земли [17]. Наблюдения и исследования планеты Земля проводятся с помощью “световых технологий”. Скорость света такова, что исследуемый объект можно считать “стационарным”, и в теории переноса солнечного и собственного излучения в природных средах практически решаются стационарные кинетические уравнения без временной зависимости [3, 10–20].

Современные перспективные системы дистанционного зондирования природных сред и объектов техногенной сферы носят преимущественно тематический характер и связаны с гиперспек-

тральными подходами, которые позволяют перейти от качественных и визуальных характеристик изображений к идентификации и количественным оценкам компонент среды и объектов. Носителями информации о средах и объектах в пассивных системах являются радиационные характеристики рассеянного солнечного света. Одной из актуальных задач ДЗЗ остается исследование облаков и аэрозолей — самых динамичных и неопределенных факторов в радиационном форсинге на климат. Особенно остро стоит проблема исследований их структуры и наиболее эффективным подходом является поляриметрия — это метод исследования облаков и аэрозолей по характеристикам рассеянного солнечного света с учетом его поляризации и деполяризации. Рассеянные лучи несут важную информацию о свойствах частиц, в том числе об их размере, форме, показателе преломления и химическом составе. Для решения проблемы интенсивно развивается метод, основанный на регистрации спектров высокого разрешения и гиперспектров отраженного поляризованного солнечного излучения в области полос поглощения атмосферных компонент.

Гиперспектральное дистанционное зондирование Земли — важнейшая технология мониторинга и оценки радиационного воздействия на планету Земля. В последние годы пристальное внимание исследователей направлено на совершенствование и развитие методов и средств более досконального и достоверного учета поглощения основными и малыми газами в атмосфере и оценки влияния поглощающего фактора на радиационный форсинг. В табл. 1 представлены данные о числе спектральных линий поглощающих газов в наиболее полной версии базы HITRAN-2016 [21] (США).

К формированию и тестированию этих баз привлекаются ученые из разных стран [22, 23]. По данным 2016 г. уже известны около 2 млн линий поглощения семи основных атмосферных газов, и это без учета континуального поглощения воды в разных фазах (водяной пар, капли, ледяные кристаллы) и аэрозолей разного происхождения. Для расчета коэффициентов поглощения необходимы профили метеорологических данных (температуры, давления) и концентраций компонент. И, естественно, важны время суток, сезоны, регионы и т.д. И, конечно, нужно учитывать многообразие подстилающих поверхностей и влияние океанов и облаков. В связи с возрастающим уровнем знаний о поглощении атмосферными газами и аэрозолями и об отражении оптически-активными ледяными кристаллическими перистыми облаками при непрерывном динамическом изменении и многообразии оптико-метеорологического состояния (“оптической погоды”) среды, как следствие, для расчетов нужна библиотека

математических моделей и методов в зависимости от “оптической погоды” и тематической направленности.

На современном этапе развития полинейных “Line-by-Line” (LBL) моделей дистанционного зондирования атмосфер Земли и планет методами инфракрасной спектроскопии ученые вынуждены считаться с тем, что обновление спектроскопической базы HITRAN проводится примерно каждые четыре года (начиная с 1973 г.) с целью увеличения точности этих моделей путем уточнения параметров спектральных линий (интенсивностей, положений, полуширин и т.п.). Особенно заметны изменения в трех последних версиях для семи основных атмосферных газов: в HITRAN-2008 сумма линий по всем изотопам насчитывает 1142645 линий, в HITRAN-2012 – 1652915 линий, в HITRAN-2016 – 1953316 линий [21–23].

Перистые облака являются основным источником неопределенности при построении численных моделей радиационного бюджета Земли, долгосрочного прогноза погоды и глобального изменения климата [24, 25]. Перистые облака являются объектом активного исследования наземными, самолетными и космическими инструментами, что позволяет оперативно получать информацию в глобальном масштабе. Существующие методы дистанционного исследования перистых облаков можно разделить на методы пассивного и активного зондирования. К наиболее известным инструментам пассивного зондирования облаков из космоса можно отнести MODIS, ATSR, AVHRR и POLDER (с поляризацией). Наземные измерения оптических характеристик атмосферы ведутся по всему миру и объединены сетью AERONET. Для восстановления вертикальных профилей атмосферы разработаны и широко применяются такие инструменты активного зондирования, как лидары [26, 27].

Наземные поляризационные лидары широко используются в мире во многих научных центрах и объединены в многочисленные лидарные сети [26]. Наиболее многочисленной (30 станций) является европейская лидарная сеть EARLINET. Большинство лидаров в этой сети – поляризационные и находятся в узлах сети AERONET. Достаточно крупная (20 станций) сеть AD-Net действует в Азиатском регионе. Восемь лидаров этой сети являются многоволновыми поляризационными. Лидарная сеть Латинской Америки LALINET/ALINET состоит из 10 станций. Для глобального мониторинга газового состава атмосферы создана лидарная сеть NDACC, включающая в себя 70 станций. Все указанные лидарные сети объединены единой сетью GALION, также включающей и две облачные лидарные сети: CIS-LINet и CREST.

В отличие от модели [26], созданной специально для активного метода наземного лазерного зондирования, модель FLBLM ориентирована на пассивное ДЗЗ и облаков из космоса. В обеих моделях используются фундаментальные основы “физической оптики”, позволяющие разрабатывать физически корректный математический аппарат. Разработка гиперспектральной модели переноса солнечного излучения ИК-спектра в перистых облаках с учетом поляризации и рассеяния на ледяных кристаллах несомненно представляет актуальную, но сложную комплексную задачу.

Перенос солнечной радиации в неоднородном плоском слое с учетом поляризационных эффектов и анизотропии среды описывается векторным интегро-дифференциальным кинетическим уравнением:

$$\mu \frac{\partial \mathbf{I}(\tau, \mu, \varphi)}{\partial \tau} = \mathbf{I}(\tau, \mu, \varphi) - \frac{\bar{\omega}(\tau)}{4\pi} \times \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \mathbf{R}(\alpha) \mathbf{P}(\tau, \mu, \varphi; \mu', \varphi') \mathbf{R}(\alpha') \mathbf{I}(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi',$$

$$\text{где } \mathbf{I}(\tau, \mu, \varphi) = \begin{pmatrix} I(\tau, \mu, \varphi) \\ Q(\tau, \mu, \varphi) \\ U(\tau, \mu, \varphi) \\ V(\tau, \mu, \varphi) \end{pmatrix} - \text{вектор-функция}$$

Стокса излучения [13, 16, 17, 28–30], распространяющегося в направлении с косинусом зенитного угла μ и азимутальным углом φ ; $\mathbf{P}(\tau, \mu, \varphi; \mu', \varphi')$ – фазовая матрица, характеризующая для анизотропной среды вероятность перерассеяния фотона из направления μ', φ' в направление μ, φ (для изотропной среды фазовая матрица зависит от угла между этими направлениями); $\mathbf{R}(\alpha)$ – матрица поворота на угол α ; $\bar{\omega} = \sigma_S / (\sigma_S + \sigma_a + K_v)$ – альбеда однократного рассеяния или вероятность выживания кванта ($0 < \bar{\omega} \leq 1$); σ_S и σ_a – объемные коэффициенты рассеяния (молекулярное + аэрозольное) и аэрозольного поглощения соответственно; $\tau(H) = \int_H^\infty (\sigma_S(z) + \sigma_a(z) + K_v(z)) dz$ – оптическая толщина на высоте H . Граничные условия: на верхней границе атмосферы параллельный солнечный поток, на нижней границе – отражение по закону Ламберта. Программная система АП-5 [30], разработанная С.А. Стрелковым и Т.А. Сушкевич, – это первая в мире реализация детерминированной модели переноса излучения с учетом поляризации и деполяризации в гетерогенной среде с матрицами рассеяния общего вида, с расчетом полной вектор-функции Стокса не только для пропущенного и отраженного слоев излучения, но и с подробной структурой вектор-

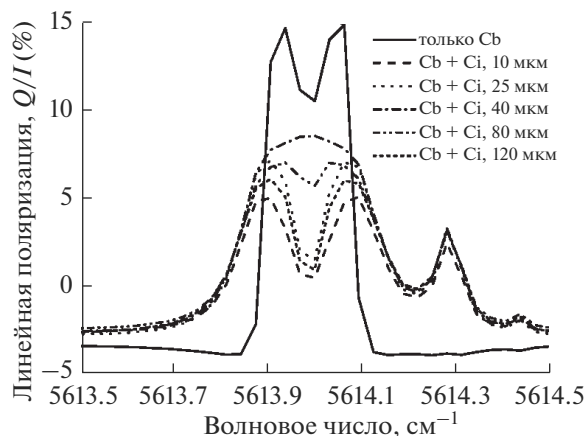


Рис. 1. Линейная поляризация Q/I (%) уходящего солнечного излучения для различных эффективных диаметров частиц перистого облака на высоте $\Delta H = 8-9$ км.

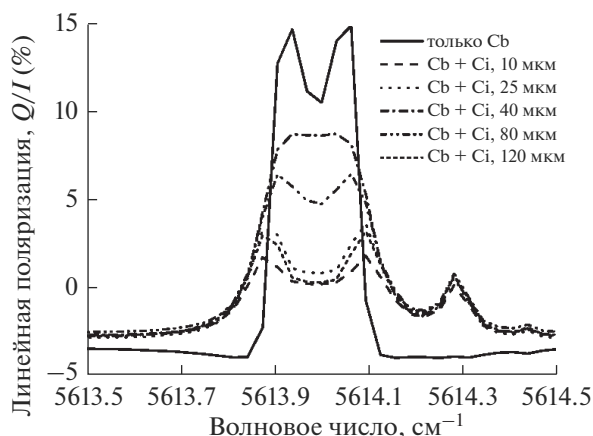


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для перистого облака в слое $\Delta H = 6-7$ км.

функции Стокса для всех направлений рассеяния излучения внутри неоднородного слоя.

В модели FLBLM, ориентированной на локальные расчеты, процесс распространения света рассматривается как случайная марковская цепь столкновений фотонов с веществом среды, в результате которых фотоны либо рассеиваются, либо поглощаются [31]. Построение случайных траекторий, которые совпадают с характеристиками дифференциального оператора уравнения переноса [16, 17], для “физической” модели процесса принято называть “прямым статистическим моделированием”. Для определения характеристик поляризованного излучения “в точке” используются локальные оценки [19, 20]. Алгоритмы “прямого статистического моделирования” естественным образом распараллеливаются путем распределения статистических испытаний по процессорам. С

ростом мощностей вычислительных систем такие алгоритмы становятся все более привлекательными для реалистичного описания “физических” процессов и для быстрых “экспресс-расчетов”.

Модель FLBLM совмещает в себе полинейный LBL метод [31] для строгого учета молекулярного (континуального и селективного) газового поглощения и метод Монте-Карло (ММК) для учета многократного рассеяния в вертикально неоднородной атмосфере с поглощающими компонентами. Монохроматический коэффициент газового поглощения K_v в любой точке оси волновых чисел

v вычисляется по формуле: $K_v = \sum_i f_i(v, v_i^*)$, где

$f_i(v, v_i^*)$ – профиль поглощения каждой суще-

ственной i -й спектральной линии, а v_i^* – ее центр. В комплексной модели FLBLM использованы численный алгоритм быстрого суммирования спектральных линий, разработанный Б.А. Фоминым [31], модели континуума MT-CKD и спектроскопические базы HITRAN.

Для моделирования процессов рассеяния выбран метод Монте-Карло, поскольку он легко объединяется с полинейным LBL методом, а относительные (статистические) погрешности ММК логарифмически уменьшаются с увеличением размера ансамбля разыгрываемых “фотонов” и слабо зависят от других факторов. Модель FLBLM легко переносится на многоядерные ноутбуки и персональные компьютеры.

Для иллюстрации модели FLBLM приведены примеры расчета вектор-функции Стокса уходящего солнечного излучения для атмосферы с облаками в спектральном интервале $5613.5-5614.5$ см^{-1} , позволяющие оценить влияние перистых облаков на спектральную поляризацию. Особенность перистых облаков: обычно оптически тонкие, но анизотропные среды с ледяной кристаллической структурой. В расчетах использована модель “оптической погоды”, типичная для атмосферы лета средних широт (Mid-Latitude Summer), с информацией о профилях температуры, давления, водяного пара, углекислого газа, озона и кислорода. Для перистых облаков взяты модели [32, 33] с шестью независимыми параметрами в фазовой матрице для различных эффективных диаметров частиц от 10 до 120 мкм, а кучево-дождевые капельные облака описываются моделью с четырьмя независимыми параметрами и эффективным диаметром капель 62 мкм из отчета [34]. Линия визирования: зенитный угол $\theta = 60^\circ$, $\varphi = 0^\circ$.

На рис. 1 представлена линейная поляризация для случая, когда кучево-дождевое облако (Cb) с оптической толщиной $\tau = 10$ расположено в слое $\Delta H = 4-5$ км, а перистое облако (Ci) с оптической толщиной $\tau = 0.01$ – в слое $\Delta H = 8-9$ км. Как ви-

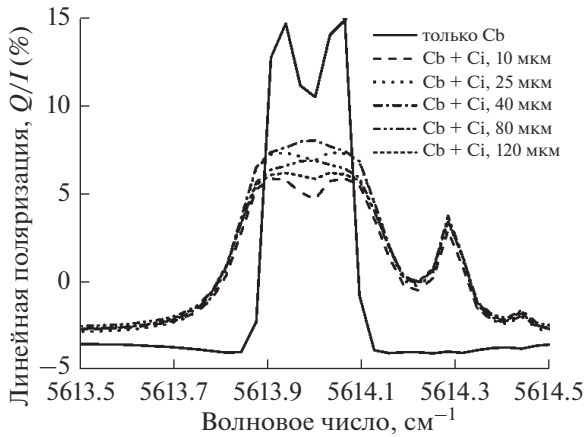


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для перистого облака в слое $\Delta H = 10\text{--}11$ км.

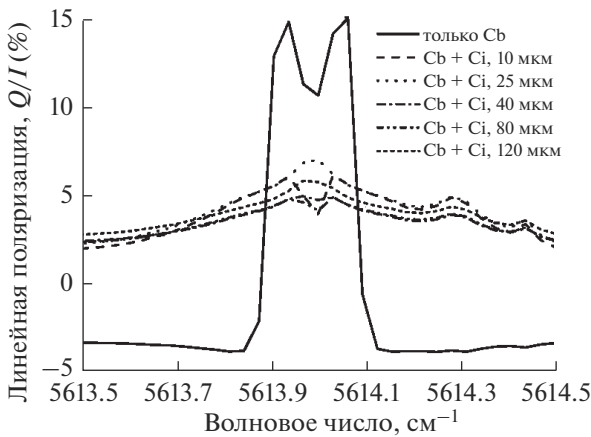


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но для перистого облака оптической толщиной $\tau = 1$.

дим, проявляются не только сам слой перистого облака, но и различия в линейной поляризации от одного до нескольких процентов для облаков с различными эффективными диаметрами частиц.

Эффект усиливается при опускании слоя перистого облака до $\Delta H = 6\text{--}7$ км, где также сильнее и молекулярное поглощение (см. рис. 2).

На высоте $\Delta H = 10\text{--}11$ км эффект ослабевает: перистые облака с различной микрофизикой становятся менее отличимыми (см. рис. 3).

Обнаружить же оптически толстое перистое облако с $\tau = 1$ можно и за пределами диапазона $5613.9\text{--}5614.1$ см⁻¹ (см. рис. 4).

Вывод: данные об ИК-спектре линейной поляризации уходящего солнечного излучения, регистрируемого поляризметрической аппаратурой из космоса, информативны для обнаружения перистых облаков над оптически толстыми кучево-дождевыми облаками и отражают микрофизику облаков.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования радиационного поля Земли — это масштабные задачи, которые никогда не имеют завершения, поскольку непрерывно меняются и никогда не повторяются “атмосфера—суша—океан” — динамическая система с непредсказуемым состоянием. Предложенная одномерная векторная гиперспектральная модель переноса солнечного излучения “Fast Line-by-Line Model” (FLBLM) позволяет моделировать поляризационные характеристики уходящей солнечной радиации с высокой точностью и любым спектральным разрешением с учетом аэрозолей, облачности и влияния температуры и давления на поглощение атмосферными газами. Усовершенствованная модель FLBLM представляет интерес для развития методов поляриметрии при наблюдении атмосферы и облаков и учета радиационного фактора в проектах Всемирной Глобальной Научной Программы “Будущее Земли”. Представленный подход можно использовать для моделирования космических экспериментов и на стадии обработки данных ДЗЗ. В России фактически разрабатываются два взаимно дополняющих подхода ДЗЗ перистых облаков средствами наземного (ИОА СО РАН, Томск) и космического базирования (ИПМ РАН и ИФА РАН, Москва).

Авторы выражают благодарность Борису Алексеевичу Фомину за помощь в работе и предоставление материалов для модельных расчетов.

21 июля 2020 г. внезапно ушел из жизни наш коллега, ведущий в мире специалист по аэрозолям и поляризации излучения, доктор физико-математических наук Михаил Иванович Мищенко (1959—2020). М.И. Мищенко окончил МФТИ, начинал научную деятельность в Главной астрономической обсерватории в Киеве (1987—1992), затем работал в Институте космических исследований имени Годдарда НАСА в Нью-Йорке. М.И. Мищенко был научным руководителем первого международного научного проекта POLDER по исследованию поляризации излучения из космоса. Это большая потеря для науки.

Исследование проведено в рамках темы 0017-2019-0002 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и темы 0017-2019-0000 ИФА им. А.М. Обухова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Future Earth. World Global Research Projects. <http://futureearth.org>; <https://unfccc.int/news/future-earth-research-for-global-sustainability>
2. The International Science Council (ISC). <https://council.science/>
3. Кузнецов Е.С. Избранные научные труды (в связи со 100-летием со дня рождения) / Отв. ред. и составитель Сушкевич Т.А. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.

4. *Келдыш М.В.* Творческий портрет по воспоминаниям современников. М.: Наука, 2001. 416 с.
5. *Сушкевич Т.А.* Главный Теоретик М.В. Келдыш и Главный Конструктор космонавтики С.П. Королев – покорители космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 9–25.
6. Всемирная конференция по изменению климата: Труды Конференции, Москва, 29 сентября–3 октября 2003 г. М.: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2004. 620 с.
7. *Кароль И.Л., Киселев В.В.* Оценка ущерба “здоровью” атмосферы // Природа. 2003. № 6. С. 25–30.
8. *Кароль И.Л., Катцов В.М., Киселев А.А., Кобышева Н.В.* О климате по существу и всерьез. СПб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2008. 55 с.
9. *Мазин И.П., Хргиан А.Х.* Облака и облачная атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометиздат, 1989. 647 с.
10. *Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V.* On the division of contribution of the atmosphere and ocean in the radiation of the Earth for the tasks of remote sensing and climate // Proc. SPIE 10466, (30.11.2017) <https://doi.org/10.1117/12.2287701>
11. *Гинзбург А.С., Мельникова И.Н., Самуленков Д.А., Сапунов М.В., Катковский Л.В.* Простая оптическая модель безоблачной и облачной атмосферы для расчета потоков солнечной радиации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 132–149
12. *Гинзбург А.С., Мельникова И.Н., Новиков С.С., Фролькис В.А.* Простая радиационная модель безоблачной и облачной атмосферы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 226–244.
13. *Чандрасекар С.* Перенос лучистой энергии / Пер. с англ., под ред. Кузнецова Е.С. М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. 432 с. (*Chandrasekhar S.* Radiative Transfer. London, Oxford, Clarendon Press, 1950. 405 p.)
14. *Кондратьев К.Я.* Перенос длинноволнового излучения в атмосфере. М.–Л.: ГИТТЛ, 1950. 288 с.
15. *Сушкевич Т.А.* Осесимметричная задача о распространении излучения в сферической системе // Отчет № 0-572-66. М.: ИПМ АН СССР, 1966. 180 с.
16. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А.* Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.
17. *Сушкевич Т.А.* Математические модели переноса излучения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 661 с.
18. *Sushkevich T.A., Strelkov S.A., Maksakova S.V.* On the spectral albedo of the Earth as an indicator of the evolution of the climate and the planet // Proc. SPIE 10833, (13.12.2018) <https://doi.org/10.1117/12.2503876>
19. *Ухинов С.А.* Методы Монте-Карло для решения задач теории переноса поляризованного излучения // Дис. докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2010. 235 с.
20. *Пригарин С.М.* Основы стохастического моделирования переноса поляризованного оптического излучения: Учебное пособие. Новосибирск: Издательство Новосибирского госуниверситета, 2010, 108 с.
21. The HITRAN Database. <https://www.cfa.harvard.edu/HITRAN/>
22. *Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C. et al.* The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer. 2017. V. 203. P. 3–69.
23. *Фомин Б.А., Колокутин Г.Э.* Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной спектроскопии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 17–24.
24. *Борисенков Е.П., Базлова Т.А., Ефимова Л.К.* Перистая облачность и ее влияние на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 120 с.
25. *Liou K.N., Yang P.* Light Scattering by Ice Crystals. Cambridge : Cambridge Printing House, 2016. 443 p.
26. *Коношонкин А.В.* Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах при лазерном зондировании // Автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. Томск, 2017. 43 с.
27. *Шишко В.А., Брюханов И.Д., Ни Е.В., Кустова Н.В., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В.* Алгоритм интерпретации матриц обратного рассеяния света перистых облаков для восстановления их микрофизических параметров // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 3. С. 186–192.
28. Stokes George Gabriel. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources // Trans. Cambr. Phil. Soc. 1852. V. 9. P. 339–416.
29. *Розенберг Г.В.* Вектор-параметр Стокса (Матричные методы учета поляризации излучения в приближении лучевой) // УФН. 1955. Т. 56. № 1. С. 77–110.
30. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А.* Программная система АП-5 “Расчет поляризационных характеристик излучения в неоднородных плоских слоях”. Инструкция // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР. 1980. № 36. 44 с.
31. *Fomin B.A.* Effective interpolation technique for line-by-line calculations of radiation absorption in gases // J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer. 1995. V. 53. P. 663–669.
32. *Mishchenko M.I., Hovenier J.W., Travis L.D.* Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Geophysical Applications. San Diego: Academic Press, 1999. 690 p.
33. *Yang P., Bi L., Baum B.A., Liou K.N., Kattawar G.W., Mishchenko M.I., Cole B.* Spectrally Consistent Scattering, Absorption, and Polarization Properties of Atmospheric Ice Crystals at Wavelengths from 0.2 to 100 μm . // J. Atmos. Sci. 2013. V. 70. № 1. P. 330–47.
34. *Stephens G.L.* Optical properties of eight water cloud types // CSIRO Aust. Div. Atmos. Phys. Tech. Paper. Australia, 1979. № 36. 35 p.

Hyperspectral Model of Solar Radiation Transfer in an Atmosphere with Cirrus Clouds

T. A. Sushkevich^{1,*} and V. A. Falaleeva^{2,**}

¹*Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Miusskaya sq., 4, Moscow, 125047 Russia*

²*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevskiy per., 3, Moscow, 119017 Russia*

**e-mail: tamaras@keldysh.ru*

***e-mail: victory@phystech.edu*

The theoretical basis for the Earth remote sensing from space and radiation forcing on the climate is the radiation transfer theory, based on different approximations of the Boltzmann kinetic equations. The model of solar radiation transfer in the cloudy atmosphere “Fast Line-by-Line Model” (FLBLM) is proposed, which is improved taking into account the high resolution of the absorption spectra in the IR range, aerosol scattering and absorption, polarization effects, heterogeneous and anisotropic media. The FLBLM model, focused on local calculations and express analysis, is implemented by the method of statistical modeling using the algorithms of the Monte-Carlo method. A hyperspectral calculation of the Stokes vector-function of outgoing solar radiation for an atmosphere with cirrus clouds over cumulonimbus clouds is performed, which allows us to estimate the influence of cirrus clouds and their microphysics on spectral polarization. For cirrus clouds, models with six independent parameters in the phase matrix are used for various effective particle diameters from 10 to 120 μm , and cumulonimbus droplet clouds are described by a model with four independent parameters and an effective droplet diameter of 62 μm .

Keywords: radiation transfer equation, polarization, anisotropic medium, Cirrus clouds, ice crystals, heterogeneous system, hyperspectral model, IR spectrum, Projects “Future Earth”