

На правах рукописи

Филей Андрей Александрович

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (ФГБУ «НИЦ «Планета»), в отделе регистрации и первичной обработки спутниковых данных.

Научный руководитель: **Рублев Алексей Николаевич**,
доктор физико-математический наук,
старший научный сотрудник
ФГБУ «НИЦ «Планета»

Официальные оппоненты: **Журавлева Татьяна Борисовна**
доктор физико-математический наук,
ведущий научный сотрудник,
институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения РАН, лаборатория
атмосферной радиации

Карпов Алексей Владимирович
кандидат физико-математический наук,
старший научный сотрудник,
ИФА РАН, лаборатория оптики и микрофизики
аэрозоля.

Ведущая организация: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский

Защита диссертации состоится 20 октября 2021 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.327.003.01 при федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123242, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 11-13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте https://meteoinfo.ru/images/misc/sovnet/filey/disser_filey.pdf.

Автореферат разослан « » июня 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Шатунова

Актуальность работы

Вулканические извержения являются источником выброса в атмосферу аэрозольных частиц и малых газовых составляющих, высвобождение которых может привести к большому разнообразию последствий регионального или глобального масштаба. В региональном масштабе это может выражаться в воздействии на здоровье человека, разрушении инфраструктуры и экосистемы вблизи вулкана, в глобальном – угроза безопасности полетов, влияние на климат планеты в целом. Необходим постоянный мониторинг действующих вулканов с целью оценки возможного распространения вулканического пепла и газов для информирования соответствующих служб и ведомств об их координатах и параметрах. Для решения этих задач в настоящее время получили широкое распространение данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Установленные на космических аппаратах (КА) приборы позволяют получать информацию о характеристиках вулканического пепла в различных спектральных диапазонах длин волн: от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК)

Исследовательские институты многих стран последние 30 лет ведут работы по определению пространственных, оптических и микрофизических характеристик вулканического аэрозоля по спутниковым данным и развивают методы ассимиляции полученных результатов в различных численных моделях переноса вулканических облаков в атмосфере, а также моделях прогноза погоды и изменения климата. События, связанные с извержением исландских вулканов в 2010 и 2011 гг., показали, что существующие методики по восстановлению параметров пепла: оптической толщины (τ_{aer}), эффективного радиуса частиц (r_e) и массового содержания (M_{aer}) имеют большой разброс в результатах, который в первую очередь связан с тем, что само по себе вулканическое облако состоит не из чистого пепла, а представляет собой смесь различных компонентов пепла, смешанного с каплями воды и водным раствором серной кислоты (H_2SO_4).

Проблема получения точных оценок параметров вулканического пепла, в первую очередь, относится к вулканам региона Камчатки и Курил, где находится

самое большое на Земле количество действующих вулканов, зона активности которых покрывает как российские, так и международные авиационные маршруты. Использование данных японского геостационарного КА Himawari-8, позволяющего наблюдать за вулканами данного региона с частотой съёмки в 10 минут, открывает широкие возможности для получения информации об активности вулканов практически в режиме реального времени. Регулярно проводимые наблюдения за активностью вулканов позволяют определить время начала извержения и передать необходимую информацию о его факте в соответствующие службы и ведомства. Кроме того, для оперативного и точного прогноза распространения вулканического шлейфа помимо установления факта и времени извержения необходима информация по высоте выброса и дисперсионному составу пепла, которую можно получить из спутниковых данных.

В связи с этим разработка и совершенствование существующих методик и алгоритмов восстановления параметров вулканического пепла по спутниковым данным представляют важную и актуальную задачу. Необходимость ее решения обусловлена также развитием российской группировки гидрометеорологических спутников, целевая бортовая аппаратура которых имеет многоканальные сканирующие устройства, не уступающие по своим характеристикам зарубежным аналогам. В связи с этим настоящая диссертационная работа представляет собой комплексное теоретико-экспериментальное исследование, направленное на создание методик обнаружения по спутниковым данным вулканических облаков, определения их пространственных, оптических и микрофизических параметров.

Степень разработанности темы исследования

Разработке методик и алгоритмов обнаружения и восстановления параметров вулканического пепла по спутниковым данным посвящено большое количество работ, большая часть из которых сводится к анализу ИК излучения на длинах волн 11 и 12 мкм, т.е. является интерпретацией алгоритмов Прата (Prata,

1989) и Вена и Роуза (Wen and Rose, 1994 г.). Суть данного алгоритма заключается в том, что, зная измеренное в каналах спутникового прибора уходящее ИК излучение, можно с использованием оптической модели вулканического пепла рассчитать τ_{aer} и r_e . Однако присутствие в вулканическом облаке воды и H_2SO_4 меняет его оптические свойства. Это не позволяет точно связать оптические и микрофизические параметры вулканических облаков с количеством пепла, находящегося в облаке, с использованием только ИК каналов на длинах волн 11 и 12 мкм. Для этого необходимо проводить анализ регистрируемого спутниковым прибором излучения в видимом диапазоне (ВД) длин волн.

Регулярно проводимые под эгидой Всемирной Метеорологической Организации (ВМО) сравнения оценок параметров вулканического пепла, полученных различными исследовательскими группами, подтвердили вывод, что разнообразие возможных ситуаций, вызванных природой пепла, его взаимодействием с другими веществами, находящимися в вулканическом облаке, временной и пространственной трансформацией массовых и микрофизических характеристик может приводить к значительным отличиям в результатах получаемых оценок массового содержания пепла в вулканическом облаке. Учет специфики состава и структуры вулканического облака является основной задачей при разработке алгоритмов и методик получения оценок параметров пепла.

Цель и задачи работы

Целью диссертации является разработка методик и алгоритмов определения микрофизических и оптических характеристик вулканического пепла по спутниковым данным с учетом многокомпонентного состава вулканического облака.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Получение микрофизических и оптических моделей вулканических облаков различного состава;

2. Разработка методики моделирования измерений спутниковыми приборами солнечного и теплового излучения при наличии в атмосфере вулканических облаков;
3. Внешняя калибровка (поверка) каналов российских спутниковых приборов;
4. Программная реализация представленных в работе алгоритмов и методик восстановления параметров вулканического пепла.

Научная новизна

1. Впервые разработан алгоритм детектирования вулканического пепла на фоне кристаллической и капельной облачности по спутниковым данным.
2. Впервые разработана методика внешней калибровки данных коротковолновых каналов спутниковых приборов российских КА гидрометеорологического назначения.
3. Создано уникальное программное обеспечение для построения многокомпонентных оптических моделей вулканических облаков. Оптические модели представляют собой справочные таблицы, содержащие информацию о микрофизических и оптических параметрах вулканического пепла и его смесей с каплями воды и водными растворами H_2SO_4 в разных пропорциях.
4. Разработана принципиально новая методика определения оптических и микрофизических характеристик вулканического пепла по спутниковым данным на основе измерений в ВД и ИК диапазонах длин волн для большинства КА, включая российские.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Разработанные методики и алгоритмы для оперативного восстановления параметров вулканического пепла по спутниковым данным были реализованы в программном комплексе «PLANETA CALC VOLCANIC ASH».

2. Методика внешней калибровки коротковолновых каналов спутникового прибора МСУ-МР КА серии «Метеор-М» реализована в программном обеспечении «PLANETA CALIBRATION MSU-MR».
3. Методика внешней калибровки коротковолновых каналов спутникового прибора МСУ-ГС КА серии «Электро-Л» реализована в программном обеспечении «PLANETA CALIBRATION MSU-GS».
4. Методика смешивания аэрозольных частиц и получения оптических параметров смеси реализована в программном обеспечении «PLANETA MIXING AEROSOL FRACTIONS».
5. Выполнена апробация разработанных методик и алгоритмов в задачах восстановления параметров вулканического пепла по данным российских КА гидрометеорологического назначения.

Апробация результатов

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских научно-технических конференциях:

- «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, г. Москва, 2015, 2017, 2019 гг.;

- «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления. III Всероссийская научно-практическая конференция», Хабаровск, 2015 г.;

- «Атмосферная радиация и динамика. Международный симпозиум МСАРД-2015, 2017», Санкт-Петербург, 2015, 2017 гг.;

- 10-ое международное совещание по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг (JKASP-2018). ВУЛКАНИЗМ И СЕЙСМИЧНОСТЬ В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ, Петропавловск-Камчатский, 2018 г.;

- V Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления», Хабаровск, 2019 г.

Результаты работы представлялись на научных совещаниях:

- Meeting on the Intercomparison of Satellite-based Volcanic Ash Retrieval Algorithms within WMO SCOPE-Nowcasting, США, г. Мэдисон, Университет штата Висконсин, 2015 г.;

- WMO Intercomparison of Satellite-based Volcanic Ash Retrieval Algorithms Workshop, Италия, Катания, 2018 г.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 9 научных работах, 6 из которых изданы в периодических научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus, 1 – в журнале, рекомендованном ВАК, 2 – в материалах конференций. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы, содержащего 94 наименования. Диссертация изложена на 125 страницах, содержит 35 рисунков, 13 таблиц и приложение.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Алгоритм детектирования вулканического пепла на фоне облачности.
2. Внешняя калибровка коротковолновых каналов российских спутниковых приборов.
3. Методика построения микрофизических и оптических многокомпонентных моделей вулканических облаков для различных магматических пород (андезит, базальт и др.) и их смесей с каплями воды и водными растворами серной кислоты.

4. Методика определения микрофизических и оптических параметров вулканического пепла.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов работы подтверждается:

1. Многочисленными визуальными оценками эффективности обнаружения вулканического пепла на фоне облачности при различных вулканических извержениях;
2. Количественным совпадением полученных оценок параметров вулканического пепла с данными независимых самолетных и спутниковых лидарных измерений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава работы посвящена физическим принципам спутникового мониторинга для задач обнаружения вулканических облаков на фоне облачности и расчета основных параметров вулканического пепла. Рассмотрены физические принципы получения информации о вулканических облаках с различных спутниковых приборов. Сделаны выводы о необходимости использования пассивных мультиспектральных спутниковых приборов для оперативного решения задач обнаружения вулканических облаков. Обзор существующих методик обнаружения вулканических облаков позволил установить, что все они построены на особых свойствах взаимодействия электромагнитного излучения с частицами вулканического облака в ИК расщепленном окне прозрачности атмосферы на длинах волн 11 и 12 мкм. Суть этого взаимодействия заключается в том, что разность ($VT_{D_{11,12}}$) между яркостными температурами на длинах волн 11 (VT_{11}) и 12 (VT_{12}) мкм для вулканического пепла в сухой атмосфере будет отрицательной, а для облачности и ясного неба – положительной (Рисунок 1). Эта особенность лежит в основе классического метода обнаружения частиц вулканического пепла – метода «обратного поглощения». Сине-голубым цветом

на Рисунке 1б выделен отчетливо контрастирующий с фоном пепловый шлейф от вулкана Эйяфьядлайёкюдль во время извержения 6 мая 2010 г.

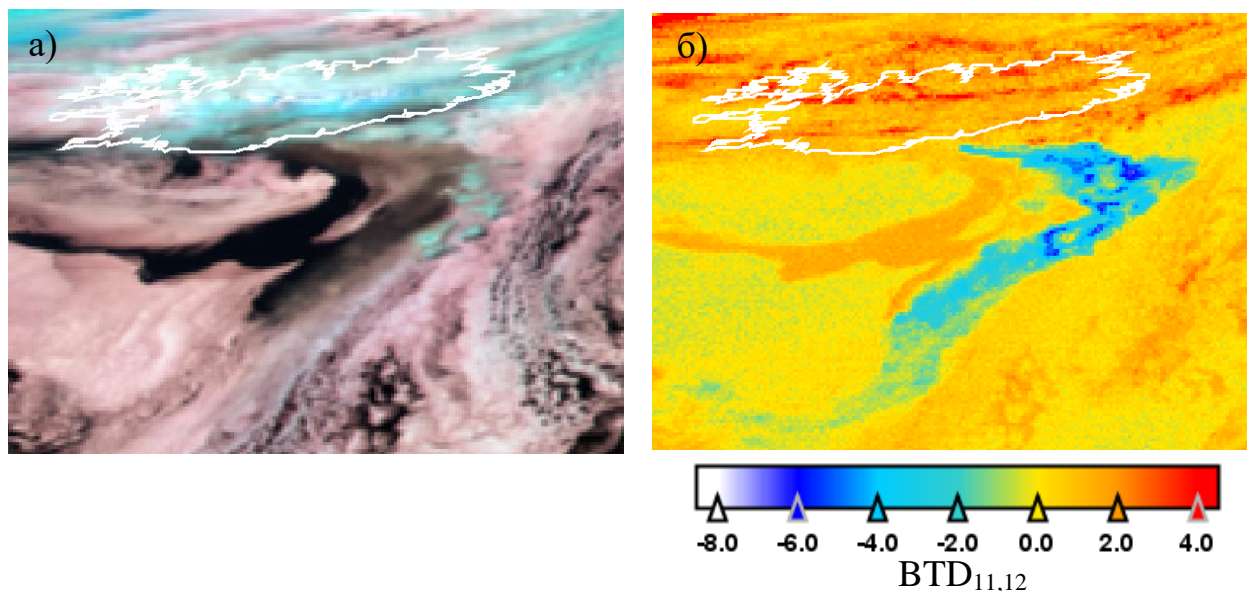


Рисунок 1 – Пепловый выброс от вулкана Эйяфьядлайёкюдль (Исландия, 6 мая 2010 г.) по данным спутникового прибора SEVIRI (КА Meteosat-9)
 а) цветосинтезированное изображение б) разность яркостных температур 11 и 12 мкм.

В ходе работы определены основные ограничения метода «обратного поглощения» для задач обнаружения вулканических облаков, заключающиеся в ложном детектировании вулканического пепла. В связи с чем был разработан альтернативный алгоритм обнаружения вулканических облаков, речь о котором идет в главе 3.

Установлено, что яркостные температуры в каналах 11 и 12 мкм могут использоваться для определения параметров вулканического пепла, а именно для восстановления оптической толщины, эффективного радиуса частиц и массового содержания пепла.

Во **второй** главе рассмотрены основные физические принципы взаимодействия электромагнитного излучения с вулканическими облаками в зависимости от длины волны излучения и от химического состава частиц

вулканического облака. Взаимодействие электромагнитного излучения с вулканическими облаками определяется процессами рассеяния и поглощения на облачных частицах в зависимости от их природы, концентрации и размеров.

В общем случае вулканические облака представляют собой смесь различных компонентов: пепел, капли воды, капли H_2SO_4 , кристаллы льда. Непосредственно вулканический пепел может быть представлен магматическим породами: андезитом, базальтом, риолитом, дацитом и др.

На Рисунке 2 представлены зависимость мнимой части показателя преломления для различных компонентов вулканического облака и вычисленный для них на основе теории Ми спектральный ход альbedo однократного рассеяния (ω). Анализ графиков позволяет выделить диапазоны длин волн, в которых поглощение или рассеяние электромагнитного излучения различных компонентов вулканического облака близки или существенно отличаются. Так, согласно Рисунку 2а, частицы вулканических горных пород будут поглощать ИК излучение сильнее на длине волны 11 мкм, чем на 12 мкм, в то время как для капель воды и кристаллов льда наблюдается обратное. Смешанный с облачностью и H_2SO_4 пепел также будет сильнее поглощать на длине волны 11 мкм, чем на 12 мкм.

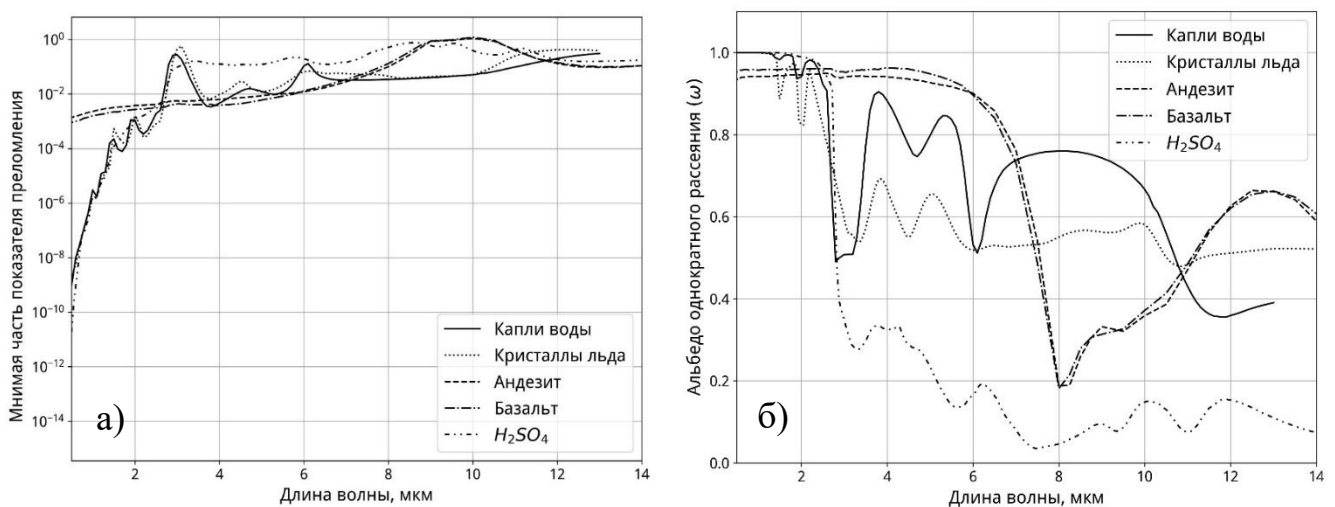


Рисунок 2 – Зависимость мнимого показателя преломления (а) и альbedo однократного рассеяния (б) от длины волны для аэрозольных компонентов вулканического облака.

Таким образом, только по поглощению нельзя явно определить, присутствует ли на спутниковом изображении чистый пепел, или это смесь пепла и облачности. Для решения этой проблемы был проведен анализ зависимости альbedo однократного рассеяния от длины волны в коротковолновой области спектра (Рисунок 2б). В результате было выделено три спектральных диапазона в окрестности длин волн 0,6, 1,6 и 3,7 мкм, коэффициенты спектральной яркости в которых позволили сделать предположение об аэрозольном составе вулканического облака и правильно выбрать подходящую оптическую модель для расчета параметров пепла.

Использование моделей для определения параметров не только вулканического пепла, но и любых аэрозолей в целом, является распространенным подходом для решения подобных задач в области ДЗЗ. Модели представляют собой справочные таблицы, состоящие из микрофизических и оптических параметров аэрозольных частиц вулканических облаков и их различных сочетаний в разных пропорциях. В качестве параметров модели выступают массовый коэффициент ослабления (m_{ext}), альbedo однократного рассеяния и коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния (g). Эти параметры вычисляются с помощью расчетов M_i для различной длины волны (λ) и эффективного радиуса частиц пепла. Для построения оптических моделей было разработано уникальное программное обеспечение, которое позволяет не только рассчитывать микрофизические и оптические параметры аэрозольных частиц, но и производить их смешивание в разных пропорциях.

Параметр m_{ext} в оптической модели определяет ослабление электромагнитного излучения на определенной длине волны и может быть выражен следующим образом:

$$m_{ext} = \frac{k_{ext}}{W_{aer}} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\int_{r_1}^{r_2} Q_{ext} r^2 n(r) dr}{\frac{4}{3} \cdot \int_{r_1}^{r_2} r^3 n(r) dr} \right] \quad (1)$$

где Q_{ext} – фактор эффективности ослабления; r – радиус частицы; $n(r)$ – функция распределения частиц по размеру; ρ – плотность частицы; k_{ext} – объемный коэффициент ослабления; W_{aer} – концентрация частиц в единице объема.

Определив из оптической модели параметр m_{ext} , можно оценить массовое содержание частиц пепла в вулканическом облаке по следующей формуле:

$$M_{aer} = W_{aer} L = W_{aer} \frac{\tau_{aer}}{k_{ext}} \quad (2)$$

L – толщина вулканического облака.

Таким образом, было установлено что выбор оптической модели компонентов вулканического облака напрямую влияет на расчет M_{aer} . Оптимальный выбор оптической модели осуществляется путем сравнения измеренных и рассчитанных интенсивностей излучения в каналах спутникового прибора. Для расчета оценок интенсивностей излучения на верхней границе атмосферы применительно к спектральным каналам спутниковых приборов использовалась быстрая радиационная модель на основе программного кода DISORT, входящего в состав библиотеки LibRadtran. Этот программный код основан на методе дискретных ординат для решения уравнения переноса излучения в плоскопараллельной атмосфере. На основе библиотеки LibRadtran было разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать излучение в каналах спутникового прибора в зависимости от функций спектральной чувствительности этих каналов. Моделирование осуществляется для различного оптического режима атмосферы и различных условий наблюдения и освещения. Оптический режим атмосферы определяется оптической моделью вулканического облака.

В **третьей главе** представлены основные алгоритмы и методики расчета параметров вулканического пепла.

Так как эффективность получения с помощью КА достоверной информации о параметрах вулканического пепла зависит от точности измерения

интенсивности излучения в каналах спутникового прибора данного КА, то для оценки точности таких измерений проводится проверка стабильности характеристик съемочной аппаратуры посредством внешней калибровки (поверки). В настоящее время распространены различные типы калибровок по следующим схемам: LEO – LEO, GEO – GEO, LEO – GEO (LEO – полярно-орбитальный КА, GEO – геостационарный КА). Для российских КА автором настоящей работы впервые были разработаны подобные схемы калибровки. В частности, для калибровки коротковолновых каналов спутникового прибора МСУ-МР была разработана схема LEO – LEO с использованием измерений схожего по спектральным характеристикам прибора AVHRR/3 (далее AVHRR) КА серии MetOp, уровень погрешности которого известен и стабилен. Радиометрическая калибровка коротковолновых каналов МСУ-МР осуществлялась по измерениям спутникового прибора AVHRR над однородными участками земной поверхности (пустынные полигоны) с постоянными климатическими условиями. Для калибровки измерений спутникового прибора МСУ-ГС была разработана схема по методу LEO – GEO на основе областей глубокой конвективной облачности (DCC). DCC – это переохлажденная облачность, которая имеет стабильное альбедо, проникает в стратосферу до высот от 14 до 19 км и обладает более высокой отражательной способностью, чем пустынные или снежные объекты.

Калиброванные значения интенсивностей излучения в каналах спутникового прибора используются для восстановления параметров вулканического пепла. Восстановление начинается с детектирования пепла на спутниковых изображениях. Для этих целей используется «пятиканальный алгоритм», который был разработан на основе анализа измерений в пяти спектральных каналах с длинами волн 0,55, 1,6, 3,7, 11 и 12 мкм. В отличие от распространённого метода «обратного поглощения», использование пяти каналов позволяет определить характерные особенности взаимодействия частиц вулканического пепла с точки зрения поглощения и рассеяния, и как следствие, более точно выделить облака вулканического пепла на фоне капельной или кристаллической облачности. На

основе анализа большого количества спутниковых сцен и сценариев моделирования переноса излучения были рассчитаны пороговые спектральные тесты, которые однозначно связаны с обнаружением вулканических облаков и описывают их спектральные особенности. Результатом работы пороговых тестов является маска вулканических облаков. К полученной маске применяется простой пространственный фильтр размером 9×9 пикселей. Помеченные как содержащие вулканический пепел пиксели в области 9×9 отбраковываются (относятся к не содержащим вулканический пепел) при условии, что их количество составляет менее 20% от всех пикселей этой области. Этот простой фильтр действует для устранения рассеянных «шумных» пикселей и уменьшает количество случаев на краях облачности, ошибочно помеченных как пепел.

Для пикселей пепловой маски осуществляется расчет параметров вулканического пепла. Сначала определяется высота верхней границы вулканических облаков (H_{cld}). Идея восстановления H_{cld} ничем не отличается от методик определения высоты капельной или кристаллической облачности и сводится к анализу спутниковых измерений яркостной температуры в расщепленном окне прозрачности атмосферы на длинах волн 11 и 12 мкм совместно с прогностической информацией о вертикальном распределении температуры и содержании водяного пара в атмосфере. На практике для определения H_{cld} рассчитывается температура верхней границы вулканического облака (T_{cld}), по значениям которой из численной модели прогноза погоды (ЧПП) оценивается уровень атмосферы, которому будет соответствовать определённая высота, близкая к H_{cld} . Расчет T_{cld} осуществляется решением обратной задачи по фактическим измерениям в каналах спутникового прибора на длинах волн 11 и 12 мкм. В ходе ее решения сопоставляются рассчитанные и фактические измерения в каналах спутникового прибора с целью оценки искомого параметра, в данном случае T_{cld} . Расчет интенсивностей ИК излучения R_{IR} в каналах спутникового прибора осуществляется по следующей формуле:

$$R_{\text{IR}} = (1 - \varepsilon_c)(R_{\text{clr}} - R_{\text{ac}}) + R_{\text{ac}} + \varepsilon_c t_{\text{ac}} B(T_{\text{cld}}) \quad (3)$$

где ε_c – коэффициент излучательной способности облака; R_{clr} – излучение «чистого» неба; R_{ac} – излучение атмосферы над вулканическим облаком; t_{ac} – коэффициент пропускания атмосферы над вулканическим облаком; B – функция Планка.

Процедура восстановления T_{cld} начинается с построения прямой модели вида:

$$\begin{aligned}
 y &= F(x, p) + e, \\
 y &= [BT_{11}, BTD_{11,12}] \\
 x &= [T_{cld}, \varepsilon_{11}, \beta_{12/11}] \\
 p &= [R_{ac}, t_{ac}, R_{clr}, \theta] \\
 \beta_{12/11} &= \frac{\ln(1 - \varepsilon_{12})}{\ln(1 - \varepsilon_{11})}
 \end{aligned} \tag{4}$$

где y – вектор измерений, размерностью M ; x – вектор искомых параметров, размерностью N ; F – оператор прямой модели; e – ошибки измерений; p – вектор вспомогательных данных.

Такие параметры вектора p , как R_{clr} , R_{ac} , t_{ac} , определяются при помощи быстрой радиационной модели переноса излучения RTTOV, на вход которой подаются температура подстилающей поверхности T_s , профили водяного пара и температуры, полученные из численного прогноза погоды GFS с пространственным разрешением 0,25 градуса.

Интенсивность излучения, рассчитанная с помощью выражения (3), преобразуется в яркостную температуру и становится входным параметром оператора прямой модели F . Предполагая, что измерения и искомые параметры могут быть описаны гауссовым распределением, оценка вектора x , при котором достигается максимум вероятности того, что смоделированные измерения наиболее точно соответствуют фактическим измерениям, может быть определена минимизацией целевой функции вида:

$$\phi = (x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) + (y - F(x, p))^T S_y^{-1} (y - F(x, p)) \tag{5}$$

где S_a – ковариационная матрица ошибок начальных приближений искомых параметров; x_a – вектор априорной информации; S_y – ковариационная матрица ошибок измерения; ϕ – целевая функция.

Результатом решения обратной задачи является нахождение трех параметров T_{cld} , $\beta_{12/11}$, ϵ_{11} . Значение T_{cld} используется для восстановления H_{cld} по следующей схеме: ищется искомый уровень атмосферы из модели ЧПП, на котором T_{cld} будет максимально близко к температуре в вертикальном профиле. Далее, путем интерполяции между двумя соседними уровнями, определяется H_{cld} по следующей формуле:

$$H_{cld} = H_{1,nwp} - \frac{(T_{cld} - T_{1,nwp})}{T_{2,nwp} - T_{1,nwp}} (H_{2,nwp} - H_{1,nwp}) \quad (6)$$

где $H_{1,nwp}, T_{1,nwp}$ – высота и температура на искомом уровне атмосферы; $H_{2,nwp}, T_{2,nwp}$ – высота и температура на ближайшем (к искомому) уровне атмосферы.

После восстановления H_{cld} определяются остальные параметры вулканического пепла, такие как M_{aer} , τ_{aer} , r_e . Представленная в настоящей работе методика определения параметров пепла сводится к одновременному использованию нескольких моделей вулканических облаков, состоящих из пепла различной природы в сочетании с каплями воды или H_2SO_4 .

Определение параметров пепла проводится как по характеристикам солнечного излучения, отраженного от вулканического облака, так и собственного излучения облака атмосферы на длинах волн 11 и 12 мкм. Учитывая разнообразие геометрии наблюдений и изменчивость оптического режима атмосферы, с помощью радиационных расчетов в видимой и ИК областях спектра определяются сигналы в спектральных каналах спутниковых приборов при различных комбинациях значений τ_{aer} и r_e для каждой модели вулканического облака. В видимой области спектра такими сигналами являются коэффициенты отражения, в ИК – яркостные температуры. Рассчитанные сигналы всех оптических моделей для конкретной схемы наблюдений сопоставляются с

реальными измерениями в каналах спутникового прибора. С помощью метода минимизации среднеквадратической невязки между рассчитанными и измеренными сигналами осуществляется конкретный выбор оптической модели, и затем оцениваются параметры вулканического пепла.

При выборе оптической модели используется параметр β с отношением длин волн 12/11 и 8,5/11 мкм (при наличии у спутникового прибора канала 8,5 мкм) и измеренное спутниковым прибором отношение коэффициентов излучения на длинах волн 3,7 и 0,55 мкм ($R_{3.7}/R_{0.55}$). Дополнительное использование параметра $\beta_{8.5/11}$ позволяет улучшить обнаружение вулканических облаков на фоне кристаллической или капельной облачности. Выбор оптической модели осуществляется минимизацией невязок, определяемых следующим выражением:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^3 \frac{[S_{obs,i}(\beta_{12/11}, \beta_{8.5/11}, R_{3.7,0.6}) - S_{theo,i}(\beta_{12/11}, \beta_{8.5/11}, R_{3.7,0.6})]^2}{\sigma_i^2} \quad (7)$$

где S – вектор параметров; χ^2 – невязка; σ_i – среднеквадратичное отклонение ($\sigma(S_{obs,i})$).

Каждой выбранной оптической модели для определенной длины волны соответствует своя линейка значений оптических параметров m_{ext} , ω и g , которые зависят от r_e . В ИК области спектра рассчитанные по спутниковым измерениям значения $\beta_{12/11}$ равны модельным $\beta_{12/11,mod}$, рассчитанным по следующей формуле:

$$\beta_{12/11,mod} = \frac{(1 - \omega_{12} \cdot g_{12})m_{ext,12}}{(1 - \omega_{11} \cdot g_{11})m_{ext,11}} \quad (8)$$

Сравнивая рассчитанные и модельные значения параметра $\beta_{12/11}$, можно определить r_e . Коэффициент ε_{11} , который был вычислен в ходе решения обратной задачи по восстановлению N_{cld} , используется для расчета τ_{aer} . При этом рассчитанные значения τ_{aer} позволяют с помощью выражения (2) определить M_{aer} .

В четвертой главе представлены результаты валидации восстановленных по спутниковым данным параметров вулканического пепла. Для восстановления

параметров использовались данные следующих спутниковых приборов: SEVIRI (КА Meteosat-9), AVHRR (КА серии MetOp), MODIS (КА Aqua) и АНН (КА Himawari-8). В качестве независимого источника информации по M_{aer} и τ_{aer} использовались измерения, полученные во время экспериментального полета научно-исследовательского самолета FAAM BAe-146 над Великобританией и окружающими морями в мае 2010 г. при извержении вулкана Эйяфьядлайёкюдль. Для валидации N_{cld} в качестве независимого источника информации использовались измерения спутникового лидара CALIOP (КА CALIPSO). Рассматривались следующие вулканические выбросы: Эйяфьядлайёкюдль (6, 7, 11, 14, 16, 17 мая 2010 г.), Гримсвотн (23 мая 2011 г.), Райкоке (21 июня 2019 г.), Пуеуэ (5 июня 2011 г.).

Предварительно для каждой спутниковой сцены осуществлялась оценка эффективности построения пепловой маски с использованием методики, описанной в главе 3. Качество построенной маски визуально сравнивалось с результатами, полученными с использованием метода «обратного поглощения». Качественная оценка эффективности обнаружения вулканического пепла показала, что представленный в главе 3 «пятиканальный алгоритм» более чувствителен к присутствию вулканического пепла и менее подвержен ложным сигналам, чем метод «обратного поглощения». Алгоритм хорошо показал себя при обнаружении оптически толстых вулканических облаков.

Для пикселей, определённых маской вулканического пепла, проводилась валидация искомых параметров. Сравнение спутниковых и самолетных оценок M_{aer} и τ_{aer} осуществлялось по следующей схеме. Отбирались данные, когда разница по времени между съемкой спутникового прибора SEVIRI и временем пролета самолета FAAM BAe-146 не превышала 2 минут. Затем происходило пространственное совмещение: для каждого пикселя, помеченного пепловой маской, осуществлялся поиск ближайшего самолетного измерения. В сравнении участвовали измерения с массовым содержанием пепла более $0,1 \text{ г/м}^2$, чтобы не учитывать измерения, где нет вулканического пепла.

Для анализа восстановленных значений H_{cld} отбирались пролеты КА CALIPSO и КА Aqua с разницей по времени, не превышающей 15 минут. Затем происходило пространственное совмещение: для каждого лидарного измерения осуществлялся поиск ближайшего облачного пикселя по данным MODIS. Использовались следующие наборы данных КА CALIPSO: коэффициент обратного рассеяния на длине волны 532 нм с пространственным разрешением 1 км, маска и типы облачности с разрешением 5 км.

В Таблице 1 представлены результаты валидации параметров вулканического пепла.

Таблица 1 – Результаты валидации параметров вулканического пепла.

Параметр	MAE	RMSE	R
M_{aer}	0,11 г/м ²	0,17 г/м ²	0,79
τ_{aer}	0,14	0,18	0,73
H_{cld}	0,85 км	1,14 км	0,95
MAE – средняя абсолютная ошибка			
RMSE – среднеквадратическая ошибка			
R – коэффициент корреляции			

Результаты сравнения M_{aer} , являющегося основным показателем для принятия решения о безопасности полетов, с коэффициентом корреляции больше 0,7 говорят о высокой согласованности спутниковых и самолетных оценок.

Во время полета научно-исследовательского самолета FAAM B Ae-146, осуществлялся забор проб пепла. Анализ показал, что частицы пепла в слое атмосферы распределены по логнормальному закону с преобладанием размеров 1-10 мкм и пиком распределения в районе 1,8 мкм. Это хорошо согласуется с представленным на Рисунке 3 результатом распределения частиц пепла по данным SEVIRI, полученное для всех детектированных пепловых пикселей на рассматриваемых спутниковых изображениях за исследуемые даты.

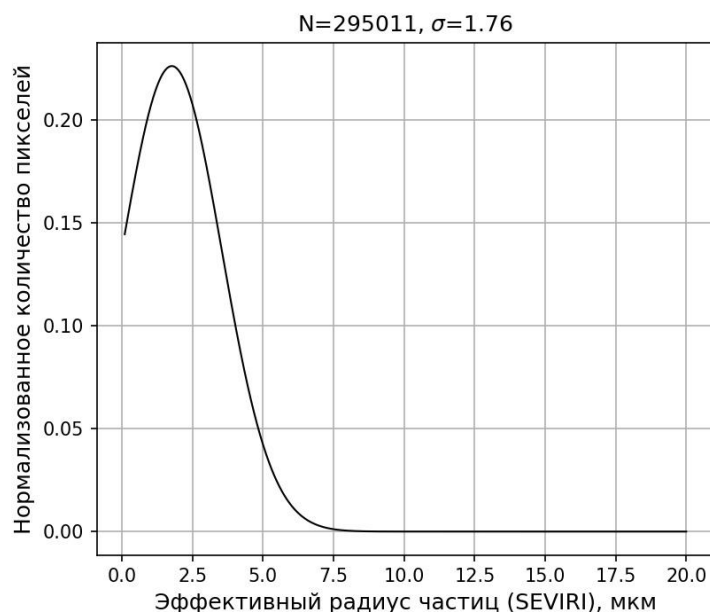


Рисунок 3 – Распределение частиц вулканического пепла по размерам по данным SEVIRI (за 14, 16 и 17 мая 2010 г.).

В пятой главе представлено описание программного комплекса восстановления параметров вулканического пепла по спутниковым данным («PLANETA CALC VOLCANIC ASH»). В программном комплексе реализованы представленные в настоящей работе методики и алгоритмы. Уникальность программного комплекса заключается в гибкости работы с новыми спутниковыми приборами. Учитывая информацию о функциях спектральной чувствительности каналов спутникового прибора, в комплекс добавляются только новые оптические модели, а также справочные таблицы в виде рассчитанных интенсивностей излучения в каналах для различных атмосферных условий и геометрии наблюдений.

Программный комплекс работает в автоматическом режиме, осуществляет полный цикл, включающий чтение данных спутникового прибора, детектирование вулканических облаков и предоставление оператору информации о параметрах пепла в виде растровых изображений или цифровых массивов данных. На Рисунке 4 представлены информационные продукты параметров вулканического пепла, восстановленные по данным радиометра AVHRR (КА

MetOp-B) с помощью программного комплекса при извержении вулкана Безымянный на Камчатке (15 мая 2019 г., 23:55 UTC).

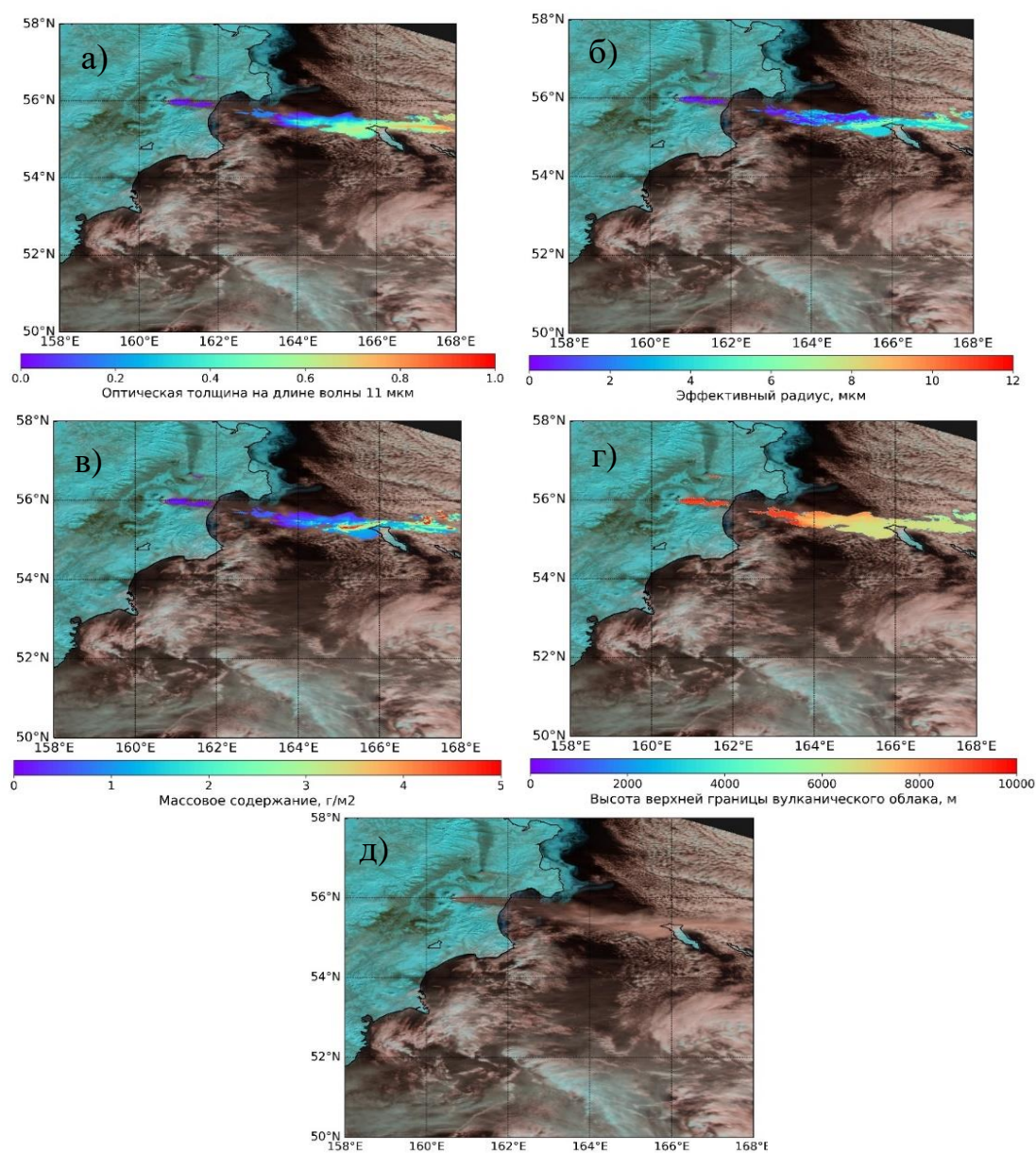


Рисунок 4 – Примеры информационной продукции программного комплекса «PLANETA CALC VOLCANIC ASH» при извержении вулкана Безымянный 15 мая 2019 г.: а) оптическая толщина на длине волны 11 мкм б) эффективный радиус частиц в) массовое содержание г) высота верхней границы д) цветосинтезированное изображение.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные научные и практические **результаты** диссертационной работы:

1. Разработана методика детектирования вулканических облаков на фоне капельной и кристаллической облачности;
2. Разработаны схемы внешней калибровки коротковолновых каналов спутниковых приборов российских КА;
3. Разработано программное обеспечение для моделирования излучения на верхней границе атмосферы в каналах спутниковых приборов в условиях многокомпонентных вулканических облаков;
4. Разработано программное обеспечение для построения оптических и микрофизических моделей вулканических облаков;
5. Построены многокомпонентные оптические модели вулканических облаков;
6. Разработана методика определения высоты верхней границы вулканических облаков;
7. Разработана методика определения оптических и микрофизических характеристик вулканического пепла по спутниковым данным;
8. Проведена валидация спутниковых оценок параметров вулканического пепла путем сопоставления с данными независимых самолетных и лидарных измерений. В результате валидации полученная среднеквадратическая ошибка составила: для массового содержания – 0,17 г/м², для оптической толщины – 0,18, для высоты верхней границы – 1,14 км;
9. На основе представленных в работе методик и алгоритмов реализован программный комплекс «PLANETA CALC VOLCANIC ASH», который позволяет восстанавливать параметры вулканического пепла по спутниковым данным.

В **приложении** представлены копии свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в список ВАК и базы данных WoS и Scopus

1. Филей А.А. Радиометрическая интеркалибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Метеор-М» № 2 по радиометру AVHRR КА «MetOp-A» / А.А. Филей, А.Н. Рублев, А.А. Зайцев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2016. - Т. 6. № 13.- С. 251-263.
2. Филей А.А. Радиометрическая калибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Электро-Л» №2 на основе областей глубокой конвективной облачности / А.А. Филей, А.Н. Рублев, А.А. Зайцев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2017. - Т. 14. № 7. - С. 31-38.
3. Филей А.А. Оценка стабильности радиометрической калибровки коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Метеор-М» №2 / А.А. Филей, А.Н. Рублев, Ю.В. Киселева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2018. - Т. 15. № 4. - С. 71-77
4. Филей А.А. Автоматическое обнаружение вулканического пепла по спутниковым данным / А.А. Филей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - 2019. - Т. 16. № 4. - С. 63-73.
5. Филей А.А. Построение моделей оптических параметров вулканических облаков для задач дистанционного зондирования Земли из космоса / А.А. Филей // Оптика атмосферы и океана. - 2020. - Т. 33. № 2. - С. 127-134.
6. Filei A. Radiometric inter-calibration of MSU-MR shortwave channels on-board Meteor-M No. 2 relative to AVHRR on-board Metop-A / A. Filei, A. Rublev, A. Zaitsev // GSICS Quarterly: Winter Issue 2018. - 2018a. - Vol.12. No. 1. - P.11-13.

7. Filei A. Radiometric inter-calibration between MSU-GS and VIIRS shortwave channels / A. Filei, A. Rublev, Yu. Kiseleva // GSICS Quarterly: Winter Issue 2018. - 2018b. - Vol. 12. No. 1. - P. 13-15.

Другие публикации

8. Филей А.А. Определение параметров вулканического пепла по спутниковым данным / А.А. Филей, А.Н. Рублев, Ю.В. Киселева // Материалы III всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (Хабаровск, 30 июня-04 июля 2015 г.). - Хабаровск: ТОГУ, 2015. - 205 с.
9. Филей А.А. Спутниковый мониторинг облаков вулканического пепла / А.А. Филей, А.Н. Рублев // Материалы 17-й всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». (Москва, 11-15 ноября 2019 г.). - М.: ИКИ РАН, 2019. - 127 с.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

10. Филей А.А. Программный комплекс восстановления параметров вулканического пепла по спутниковым данным «PLANETA CALC VOLCANIC ASH» / А.А. Филей, Ю.А. Попкова. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2017610222.
11. Филей А.А. Программное обеспечение для калибровки коротковолновых каналов спутникового прибора МСУ-МР КА серии «Метеор-М» «PLANETA CALIBRATION MSU-MR» / А.А. Филей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2017662923.
12. Филей А.А. Программное обеспечение для калибровки коротковолновых каналов спутникового прибора МСУ-ГС КА серии «Электро-Л» «PLANETA CALIBRATION MSU-GS» / А.А. Филей, В.В. Суханова, Ю.А. Шамилова. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2019614263.

13. Филей А.А. Программное обеспечение для смешивания аэрозольных частиц и получения оптических параметров смеси «PLANETA MIXING AEROSOL FRACTIONS» / А.А. Филей, Ю.А. Амельченко. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2020616602.